



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI EKSPERIMEN UJI PERFORMA DAN
KARAKTERISTIK SEMPROTAN INJEKTOR SINJAI-
150 DENGAN PEMANASAN BAHAN BAKAR
BIOETANOL (E100)**

**RAMADHANI AYU SETIA NINGRUM
NRP. 2113 100 067**

**Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**



TUGAS AKHIR - TM091585

**STUDI EKSPERIMEN UJI PERFORMA DAN
KARAKTERISTIK SEMPROTAN INJEKTOR
SINJAI-150 DENGAN PEMANASAN BAHAN BAKAR
BIOETANOL (E100)**

**RAMADHANI AYU SETIA NINGRUM
NRP. 2113 100 067**

**Dosen Pembimbing
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018**



FINAL PROJECT - TM141585

EXPERIMENTAL STUDY OF TEST PERFORMANCE AND SPRAY CHARACTERISTICS OF INJECTOR SINJAI-150 WITH HEATED BIOETHANOL FUEL (E100)

RAMADHANI AYU SETIA NINGRUM
NRP. 2113 100 067

Advisor
Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2018

**STUDI EKSPERIMEN UJI PERFORMA DAN
KARAKTERISTIK SEMPROTAN INJEKTOR
SINJAI-150 DENGAN PEMANASAN BAHAN BAKAR
BIOETANOL (E100)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RAMADHANI AYU SETIA NINGRUM

NRP. 2113 100 067

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang Sudarmanta, S.T., M.T. (Pembimbing)
NIP. 197301161997021001
2. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh W., M.E. (Penguji I)
NIP. 195312191981031001
3. Dr. Wawan Aries Widodo, M.T. (Penguji II)
NIP. 197104051997021001

SURABAYA

JANUARI, 2018

STUDI EKSPERIMEN UJI PERFORMA DAN KARAKTERISTIK SEMPROTAN INJEKTOR SINJAI-150 DENGAN PEMANASAN BAHAN BAKAR BIOETANOL (E100)

Nama Mahasiswa : Ramadhani Ayu Setia Ningrum
Nrp : 2113 100 067
Jurusan : Teknik Mesin
Pembimbing : Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

Abstrak

Bioetanol merupakan bahan bakar nabati untuk kendaraan bermotor. Keuntungan dari pemanfaatan bioetanol sebagai bahan bakar alternatif adalah menghasilkan polutan rendah dan memiliki nilai oktan yang tinggi. Salah satu properties bioetanol yang menyebabkan sulitnya penyalaan awal adalah panas penguapan bioetanol yang bernilai tiga kali dari bahan bakar fosil yaitu sebesar 904 kJ/kg, sehingga memerlukan pemanasan awla untuk mempermudah proses penyalaan awal. Berkaitan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan memberikan pemanasan bahan bakar. Selain itu, karakteristik semprotan berupa Sauter Mean Diameter, panjang penetrasi dan sudut semprotan juga ditinjau untuk mengetahui atomisasi bahan bakar tersebut.

Penelitian dimulai dengan pengujian injektor mesin sinjai yang telah diberi pemanas dengan menggunakan alat injector tester. Pengujian dilakukan dengan memasang injector yang telah diberi pemanas tambahan ke alat injector tester. Mekanisme pemanasan yang dilakukan adalah mengatur termokontrol untuk mendapatkan temperatur keluaran 60⁰, 70⁰ dan 80⁰ C. Ketika telah terpasang, dilakukan pengaturan parameter injeksi pada injector tester. Parameter yang diatur pada injector tester adalah mode pengetesan, tekanan injeksi dan durasi injeksi. Mode pengetesan yang digunakan adalah uniformity/sprayability Test. Tekanan diatur pada 3, 4, dan 5 bar. Sedangkan Pulse width divariasikan sebesar 3, 4, 5 dan 6 ms. Pengujian dilakukan pada putaran 2000

rpm. Bahan bakar yang digunakan dalam pengujian ini adalah bioetanol E100. Dokumentasi semprotan injeksi dilakukan dengan menggunakan high-speed camera. Hasil dokumentasi digunakan untuk mengukur panjang penetrasi, Sauter Mean Diameter dan sudut penyebaran semprotan. Volume bahan bakar yang disemprotkan didapat pada setiap variasi yang kemudian dikonversikan menjadi mass flowrate bahan bakar.

Hasil yang didapat dalam penelitian kali ini adalah jeda waktu dari pompa bahan bakar hingga bahan bakar menyembrot selama 1,549 detik, sedangkan waktu needle menutup tanpa adanya bahan bakar sisa yang keluar selama 3,872 detik. Nilai Sauter Mean Diameter menurun seiring dengan peningkatan tekanan injeksi dan temperatur bahan bakar. Sudut semprotan yang dihasilkan oleh injektor meningkat seiring dengan naiknya tekanan injeksi dan temperatur bahan bakar. Sedangkan panjang penetrasi meningkat seiring dengan naiknya tekanan dan menurun seiring meningkatnya temperatur bahan bakar. Laju alir massa semakin menurun seiring dengan peningkatan temperatur bahan bakar dan meningkat seiring dengan meningkatnya pulse width dan tekanan injeksi. Hal ini berlaku untuk putaran engine terendah yaitu 2000 rpm dan putaran maksimal engine yaitu 8000rpm.

Kata kunci : Bioethanol, injektor, pemanas, Sinjai-150

EXPERIMENTAL STUDY OF TEST PERFORMANCE AND SPRAY CHARACTERISTICS OF INJECTOR SINJAI-150 WITH HEATED BIOETHANOL FUEL (E100)

Name : Ramadhani Ayu Setia Ningrum
NRP : 2113 100 067
Department : Mechanical Engineering
Advisor : Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT.

Abstract

Bioethanol is an alternative fuel for vehicles. The advantage of bioethanol as an alternative fuel is it produces low pollutants and have high octane number. One of bioethanol problem is the high latent heat of vaporization can induce running difficulties in cold conditions, especially cold start To overcome this problem then bioethanol is heated on tip injector. In addition, the spray characteristics of Sauter Mean Diameter, penetration length and spray angle are also reviewed to determine the atomization of the fuel.

The experiment was started with a sinjai injector test that had been heated using an injector tester. The test was done by connect the injector that has been heater added to the injector tester tool. The heating mechanism was to regulate the thermocontrol to obtain 60, 70 and 80°C output temperatures. When installed, the parameters of the injection injector tester are adjusted. The parameters set on the injector tester are test mode, injection pressure and injection duration. Test mode used is uniformity / sprayability Test. Pressure was set at 3, 4, and 5 bars. Pulse width was varied by 3, 4, 5 and 6 ms. Testing was done at 2000 rpm. The fuel used in this test was the bioethanol E100. Injection spray documentation was captured using a high-speed camera. Documentation results were used to measure penetration

length, Sauter Mean Diameter and spreading angle of spray. Sprayed fuel volume is obtained at each variation which is then converted into fuel mass flowrate.

The results in this study is the time delay from the fuel pump to fuel spray for 1.549 seconds, while the needle time closes in the absence of spent fuel for 3.872 seconds. The Sauter mean diameter decreases with increasing injection pressure and fuel temperature. The spray angle increases with increasing injection pressure and fuel temperature. While the penetration length increases with increasing injection pressure and decreases with increasing temperature of fuel. The mass flow rate decreases with increasing fuel temperature and increases with increasing pulse width and injection pressure. This applies to the lowest engine rotation of 2000 rpm and highest engine rotation of 8000rpm.

Keywords: Bioethanol, injector, heater, Sinjai-150

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena atas rahmat dan hidayah-Nya, tugas akhir yang berjudul “Studi Eksperimen Uji Performa dan Karakteristik Semprotan Injektor Sinjai-150 dengan Pemanasan Bahan Bakar Bioetanol (E100)” ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik dan lancar.

Banyak dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini hingga terselesaikannya laporan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Ayah dan Ibu serta saudara-saudaraku tercinta yang benar - benar memberikan dorongan dan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas dan tak terbalaskan, doa dan restunya.
2. Bapak Dr. Bambang Sudarmanta, ST., MT sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Budi Utomo K. W. ME., Dr. Wawan Aries W,S.T.,M.T, Bambang Arip D., ST, M.Eng., PhD. dan Ary Bactiar K.P.,ST.MT.Phd selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Ir. Bambang Pramujati M.Eng.Sc., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
5. Ibu Vivien Suphandani S.T., M.E., PhD sebagai dosen wali yang telah memberikan pengarahan selama masa kuliah
6. Amal sebagai rekan tugas akhir penulis serta Mas yoga yang membantu proses kelancaran pengujian dan tugas akhir kami.
7. Ayzam, Tedi, Mas Hadit (Alm), Amel, Lana, Andre, Alwi, Nafis, Intan D, dan Intan Kum yang telah mewarnai hari-hari

penulis pada masa perkuliahan hingga terselesaikannya tugas akhir.

8. Mas Agi yang selalu memberi motivasi dan semangat sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.
9. Seluruh keluarga M56 yang telah memberi banyak dukungan.
10. Seluruh keluarga Ash-Shaff yang telah memberi banyak siraman rohani.
11. Seluruh keluarga laboratorium Pembakaran dan Sistem Energi yang telah memberikan bantuan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
12. Seluruh pihak yang belum disebutkan diatas yang telah memberikan doa, bantuan, dan dukungannya bagi penulis hingga tugas akhir ini terselesaikan.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa, Amin.

Dalam segala keterbatasan, kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kami mengharap kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 20 Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Injeksi Bahan Bakar	5
2.2 Injektor	7
2.3 Karakteristik Semprotan.....	8
2.4 Respon Buka-tutup Injektor	13
2.5 Bahan Bakar	14
2.5.1 Gasoline.....	14
2.5.2 Bioetanol	16
2.5.3 Perbandingan Karakteristik Bahan Bakar Gasoline dan Bioetanol E100.....	17
2.5.4 Analisa Permasalahan dan Solusi Penyalaan Bahan Bakar Bioetanol pada Temperatur Ambien Rendah.....	18
2.6 Injektor Bioetanol dengan Pemanas Induktif	20
2.7 Pemanas Induksi.....	21
2.8 Solenoid.....	23

2.9 Kebutuhan Bahan Bakar mesin Sinjai 150cc.....	25
2.10 Penelitian Terdahulu.....	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1 Peralatan Uji	35
3.1.1 Injektor Unit Test.....	35
3.1.2 Injector Tester Unit.....	37
3.1.3 Electromagnetic Induction Heater	38
3.1.4 Kamera Slow motion	39
3.2 Bahan Bakar Uji	39
3.3 Prosedur Pengujian.....	40
3.3.1 Skema Peralatan Uji	40
3.3.2 Pengujian Properties Bahan Bakar	41
3.3.3 Pengujian Karakteristik Semprotan	44
3.4 Rancangan Eksperimen	46
3.5 Flowchart Percobaan	48
3.5.1 Flowchart Penelitian	48
3.5.2 Flowchart Pengujian.....	49
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Perancangan Pemanas.....	53
4.2 Perancangan solenoid.....	55
4.3. Analisa properties bahan bakar	56
4.3.1. Analisa densitas dan viskositas kinematis dengan variasi temperatur	58
4.3.2. Analisa tegangan permukaan dengan variasi temperatur.....	59
4.4. Pengujian karakteristik semprotan.....	60
4.4.1. Laju alir massa bahan bakar	60
4.4.2. Perhitungan Sauter Mean Diameter.....	60
4.4.3. Hasil visualisasi semprotan	63
4.4.4. Analisa Sauter Mean Diameter	65
4.4.5. Analisa Panjang Penetrasi	67
4.4.6. Analisa Sudut Semprotan	69
4.5. Analisa laju alir massa bahan bakar.....	70

4.5.1. Pengaruh temperatur bioetanol terhadap laju alir massa bahan bakar.....	70
4.5.2. Pengaruh tekanan injeksi terhadap laju alir massa bahan bakar.....	73
4.6 Analisa waktu pemanasan.....	74
4.7. Analisa respon needle injektor.....	75
4.8 Analisa Laju alir massa bahan bakar pada putaran 8000rpm.....	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	79
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA.....	81
Lampiran 1 Data Pengujian.....	85
Lampiran 2 Gambar Teknik Injektor.....	91
BIOGRAFI PENULIS.....	95

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Skema sistem injeksi secara umum	6
Gambar 2. 2. Ilustrasi dari kerja injektor sistem elektronik saat injektor keadaan off (a) dan saat injektor keadaan on (b)	8
Gambar 2. 3 Parameter fisik semprotan	8
Gambar 2. 4 Kumparan induksi sederhana.....	21
Gambar 2. 5 Kumparan pemanas induksi, (ket. : L : Panjang Inductor, a : jari-jari inti induktor, d : ukuran diameter kawat penyusun induktor, N : jumlah lilitan kawat).....	22
Gambar 2. 6 <i>Free-body Diagram</i> Injektor	24
Gambar 2. 7 Grafik kenaikan temperatur dinding injektor dan etanol terhadap fungsi waktu.....	27
Gambar 2. 8. Grafik pengaruh daya pemanas terhadap fungsi waktu	27
Gambar 2. 9. Grafik pengaruh nilai koefisien perpindahan panas terhadap fungsi waktu	28
Gambar 2. 10. Grafik perbandingan metode eksperimen dibanding lumped solutions terhadap fungsi waktu	28
Gambar 2. 11. a. Injektor yang akan diteliti, b. Skema penelitian	30
Gambar 2. 12. Hubungan antara tekanan injeksi dan laju aliran massa bahan bakar etanol	30
Gambar 2. 13. Hubungan antara pengaruh temperatur pemanasan terhadap laju aliran massa bahan bakar	31
Gambar 2. 14. Hubungan antara temperatur bahan bakar terhadap densitas	32
Gambar 2. 15. Pengaruh tekanan injeksi terhadap sudut semprotan (kanan : 2 bar, kiri 4 bar)	33
Gambar 2. 16. Grafik fraksi massa uap bahan bakar pada akhir katup intake terhadap variasi temperatur.....	34
Gambar 3. 1 Injektor bioetanol E100	35
Gambar 3. 2 Injektor Tester (a) dan tampilan <i>controller</i> (b).....	37

Gambar 3. 3 Skema model injektor bioetanol E100.....	38
Gambar 3. 4 Kamera GoPro Hero 5	39
Gambar 3. 5 Skema Pengujian	40
Gambar 3. 6 Peralatan Uji densitas	41
Gambar 3. 7 Peralatan pengukuran viskositas	42
Gambar 3. 8 Skema Peralatan Uji Tegangan Permukaan.....	42
Gambar 3. 9 Peralatan Uji Visualisasi semprotan	44
Gambar 3. 10 Flowchart Penelitian	48
Gambar 3. 11 <i>Flowchart</i> pengujian tanpa pemanas	49
Gambar 3. 12 Flowchart pengujian dengan pemanas	51
Gambar 4. 1 Sambungan bawah injektor.....	53
Gambar 4. 2 <i>Free Body Diagram Needle</i> injektor.....	55
Gambar 4. 3 Grafik variasi temperatur terhadap densitas dan viskositas kinematis.....	58
Gambar 4. 4 Grafik variasi temperatur terhadap tegangan permukaan	59
Gambar 4. 5 Visualisasi Semprotan tanpa pemanas pada tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar dan (c) 5 bar.....	63
Gambar 4. 6 Visualisasi Semprotan temperatur 50°C pada tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar dan (c) 5 bar.....	64
Gambar 4. 7 Visualisasi Semprotan temperatur 60°C pada tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar dan (c) 5 bar.....	64
Gambar 4. 8 Visualisasi Semprotan temperatur 70°C pada tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar dan (c) 5 bar.....	65
Gambar 4. 9 Grafik pengaruh temperatur terhadap Sauter Mean Diameter	66
Gambar 4. 10 grafik pengaruh temperatur terhadap panjang penetrasi.....	68
Gambar 4. 11 Grafik pengaruh tekanan terhadap sudut semprotan	69
Gambar 4. 12 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 3 bar	71

Gambar 4. 13 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 4 bar	71
Gambar 4. 14 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 5 bar	72
Gambar 4. 15 Grafik pengaruh tekanan terhadap laju alir massa bahan bakar pada variasi temperatur	73
Gambar 4. 16 Grafik waktu pemanasan saat keadaan dingin	75
Gambar 4. 17 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 3 bar	76
Gambar 4. 18 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 4 bar	77
Gambar 4. 19 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 5 bar	77

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik Bahan Bakar Gasoline dan Bioetanol E100[15].....	17
Tabel 2. 2 <i>Mass Flowrate</i> bahan bakar untuk Sinjai 150cc.....	25
Tabel 3. 1 Spesifikasi Injektor yang digunakan	36
Tabel 3. 2 Rancangan Penelitian	46

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

\dot{m}	: laju alir massa (kg/s)
Re	: Bilangan Reynolds
We	: Bilangan Weber
μ_f	: Viskositas dinamis bahan bakar (cP)
μ_g	: Viskositas dinamis udara (cP)
ρ_f	: Densitas bahan bakar (kg/m ³)
ρ_g	: Densitas udara (kg/m ³)
v	: Kecepatan (m/s)
ν	: Viskositas kinematis (cSt)
σ	: Tegangan permukaan (dyne/cm ²)
ρ	: Densitas (kg/m ³)
μ	: Viskositas dinamis (cP)
d	: diameter pemanas (m)
N _n	: Jumlah lilitan pemanas
L	: Panjang lilitan (m)
D	: Diameter lubang (m)
P _w	: Daya pemanas (Watt)
C	: Kalor spesifik (kJ/kg K)
P	: Tekanan (bar)
k	: Konstanta pegas (N/m)
Δx	: Perubahan panjang pegas (m)
m	: Massa (kg)
g	: Percepatan gravitasi (m/s ²)
I	: Arus (Ampere)
V	: Volume bahan bakar yang disemprotkan (m ³)
μ_0	: Permeabilitas ruang vakum (N/A ²)
A	: Luas permukaan (m ²)
N	: Jumlah lilitan Solenoid
W	: berat (Newton)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bahan bakar memiliki peran yang penting dalam kehidupan manusia. Krisis energi yang terjadi di dunia, khususnya dari bahan bakar fosil yang bersifat tak terbaharukan (*non renewable*) disebabkan karena menipisnya cadangan minyak bumi. Hal ini mengakibatkan meningkatnya harga bahan bakar minyak (BBM). Selain itu peningkatan harga minyak bumi akan memberikan dampak yang besar bagi pembangunan bangsa Indonesia. Konsumsi BBM yang mencapai 1,3 juta/barel tidak seimbang dengan produksinya yang nilainya sekitar 1 juta/barel sehingga terdapat defisit yang harus dipenuhi melalui impor. Menurut data ESDM (2006) cadangan minyak Indonesia hanya tersisa sekitar 9 miliar barel. Apabila terus dikonsumsi tanpa ditemukannya cadangan minyak baru, diperkirakan cadangan minyak ini akan habis dalam dua dekade mendatang. Oleh karena itu perlu dicari sumber-sumber bahan bakar alternatif yang bersifat terbaharukan (*renewable*) dan ramah lingkungan.

Bioetanol diproduksi dari produk-produk hasil pertanian seperti jagung, gandum dan tebu melalui proses destilasi dan fermentasi. Saat ini bioetanol murni maupun campuran etanol dengan gasoline digunakan sebagai bahan bakar alternative pada kendaraan otomotif. Beberapa keuntungan dari pemanfaatan bioetanol sebagai bahan bakar alternatif pada mesin pembakaran dalam karena menghasilkan polutan yang rendah dan memiliki nilai oktan tinggi. Menurut Jeuland[1], bioetanol memiliki kekurangan yaitu memiliki *volalitas* moderat dan titik didih yang tinggi yaitu 78° C (1 bar) yang mengindikasikan kesulitan penguapan di kondisi lingkungan yang cenderung dingin. Bioetanol memiliki panas laten yang sangat tinggi dari penguapan sebesar 3 kali dari bahan bakar gasolin, yaitu sebesar 904 kJ/kg. Properti ini mengindikasikan kesulitan *driveability*, yaitu kebutuhan banyaknya energi untuk menguapkan bahan

bakar dalam kondisi dingin. Maka dari itu untuk menguapkan bioetanol diperlukan sebuah pemanas untuk memanaskan bahan bakar.

Pada penelitian Gayuh [2] dilakukan pengaturan pada durasi injeksi bioetanol untuk menyesuaikan perbedaan densitas dan perbandingan massa antara bioetanol dan udara. Kendala pada penelitian mereka adalah kesulitan dalam penyalaan awal. Untuk mengatasi masalah tersebut mereka menggunakan 2 tangki yang berisi gasoline dan bioetanol. Mesin dihidupkan dengan bahan bakar gasoline terlebih dahulu yang selanjutnya diganti dengan bioetanol. Berdasarkan penelitian Rezendel dan Moreira [3], kesulitan penyalaan awal diatasi dengan membuat pemanas induksi elektromagnetik di nozzle injector. Bahan bakar yang masuk ke injektor mengalami pemanasan sehingga saat keluar dari nozzle tingkat keadaan bahan bakar bertemperatur tinggi yang mampu memudahkan dalam penyalaan awal.

Berdasarkan penelitian Prayoga [4], kesulitan penyalaan awal pada mesin yang menggunakan bahan bakar bioetanol diatasi dengan menambahkan pemanas pada saluran bahan bakar sebelum memasuki injektor. Kawat pemanas yang digunakan merupakan kawat nikelin. Antara kawat nikelin dengan badan injektor diberi lapisan magnesium oksida. Magnesium oksida berfungsi untuk memberi batas antara kawat pemanas dengan badan injektor agar tidak terjadi konsleting yang menyebabkan putusanya kawat nikelin. Selain memudahkan penyalaan awal, dengan menambahkan pemanas dapat menaikkan daya dan memberikan unjuk kerja mesin yang optimal serta menurunkan kadar emisi bahan bakar.

Penelitian karakteristik semprotan pada motor otto sistem *port injection* juga dilakukan oleh Ommi *et al* [5] dengan variasi tekanan injeksi dan temperatur bahan bakar. Karakteristik semprotan yang diuji adalah *Sauter Mean Diameter*, panjang penetrasi dan sudut semprotan. Pada penelitian tersebut juga membahas pengaruh *properties* bahan bakar, tekanan injeksi serta temperatur bahan bakar terhadap karakteristik semprotan yang

mengindikasikan baik buruknya atomisasi bahan bakar. *Properties* bahan bakar yang ditinjau adalah viskositas, densitas dan tegangan permukaan.

Berdasarkan uraian tersebut mendorong untuk dilakukannya penelitian untuk mengembangkan injektor yang sesuai untuk bahan bakar bioetanol E100 dengan kemurnian 99,6%. Selain itu, peninjauan karakteristik semprotan berupa *Sauter Mean Diameter*, panjang penetrasi dan sudut semprotan juga penting untuk mengetahui atomisasi bahan bakar tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan latar belakang diatas, maka perumusan masalah pada eksperimen kali ini adalah :

1. Bagaimana kinerja fisik injektor bioetanol berupa respon buka-tutup?
2. Bagaimana performa atomisasi semprotan injektor berupa panjang penetrasi, *Sauter Mean Diameter*, dan sudut semprotan?
3. Bagaimana spesifikasi teknis injektor bioetanol pada variasi temperatur dan tekanan?

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan beberapa batasan masalah untuk memperjelas ruang lingkup penelitian. Pokok bahasannya dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut :

1. Bahan bakar yang digunakan yaitu Pertamina dan Bioetanol E100 produksi PT Eneo dengan kemurnian 99,6%.
2. Pemanas yang digunakan dalam keadaan *steady state*
3. Pengujian karakteristik semprotan menggunakan Launch CNC-601A *Injector Cleaner & Tester*
4. Pengujian dilakukan pada temperatur ruangan (20°C - 25°C)
5. Tidak membahas proses pembuatan bioetanol dan reaksi kimia yang terjadi
6. Tidak membahas proses manufaktur injektor dengan sistem pemanas

7. Hanya membahas perencanaan solenoid dan pemanas

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui kinerja fisik injektor bioetanol berupa respon buka-tutup.
2. Untuk mengetahui performa atomisasi semprotan injektor bioetanol berupa panjang penetrasi, *Sauter Mean Diameter* dan sudut semprotan.
3. Untuk mengetahui spesifikasi teknis berupa laju alir massa bahan bakar injektor bioetanol pada variasi temperatur dan tekanan

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan sumbangsih terhadap perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi mengenai penggunaan bahan bakar bioetanol pada motor otto.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Injeksi Bahan Bakar

Sistem injeksi atau EFI (*Electronic Fuel Injection*) adalah sistem yang digunakan sebagai pengganti sistem karburator, dimana pada sistem injeksi ini volume bahan bakar dan waktu penyemprotan dikendalikan secara elektrik. Karburator ataupun sistem injeksi motor didesain untuk satu kepentingan, yakni dapat optimal mensuplai campuran udara dengan bahan bakar bagi setiap keperluan operasional motor. Tetapi dalam perjalanannya karburator yang terbaikpun tidak dapat memenuhi persyaratan emisi gas buang yang boleh dikeluarkann dari ujung knalpot, sehingga dicari solusi peralatan pengganti agar gas buang yang dilepaskan dari motor menjadi ramah lingkungan. Beda fungsi utama antara karburator dan injeksi bahan bakar adalah pemasukan bahan bakar yang diatomisasi dengan tekanan besar, sedangkan di karburator pemasukan bahan bakar hanya karena keadaan vakum, dimana kevakuman terjadi karena langkah hisap piston. [6]

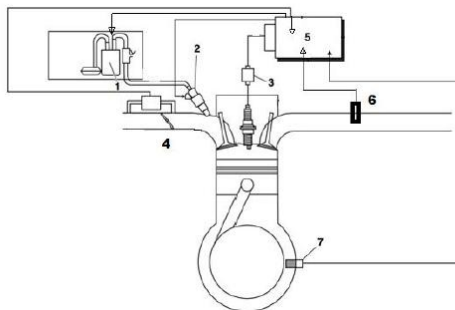
Keuntungan sistem injeksi bahan bakar dibandingkan dengan karburator yaitu :

1. Memperbaiki atomisasi bahan bakar
2. Pemecahan bahan bakar menjadi butiran lembut terjamin karena berada dibawah tekanan
3. Bahan bakar yang didistribusikan sama pada setiap silinder.
4. Putaran motor menjadi lebih halus pada kondisi idle, campuran miskin dapat digunakan karena distribusi bahan bakar yang lebih baik dan atomisasi yang baik pada kecepatan rendah.
5. Polusi yang dihasilkan lebih rendah, karena campuran bahan bakar – udara termasuk miskin sehingga mengurangi emisi gas buang
6. Meningkatkan daya keluaran karena penyemprotan jumlah bahan bakar yang sama setiap silinder dan menaikkan aliran.

7. Kerugian gesekan yang ada menjadi kecil karena tidak menggunakan venture.
8. Masuknya peralatan elektronik menjadikan peralatan pasokan bahan bakar menjadi kecil dan ringan

Secara umum konstruksi sistem EFI dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu :

1. Sistem pemasukan bahan bakar (fuel system), berfungsi untuk menyimpan, menyaring, menyalurkan , dan menginjeksikan bahan bakar ke ruang bakar
2. Sistem kontrol elektronik (electronic control system), komponen sistem kontrol elektronik terdiri dari beberapa sensor antara lain: Throttle Position Sensor (TPS), MAP (Manifold Absolute Pressure) sensor, IAT (Intake Air Temperature) sensor, Engine Cooling Temperature (ECT) Sensor, RPM sensor (Inductive Magnetic Reluctor), dan sensor-sensor lainnya. Semua sensor tersebut akan mengirimkan data ke ECU untuk diproses.
3. Sistem induksi atau sistem pemasukan udara (air induction system), sistem ini berfungsi untuk menyalurkan sejumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran dalam ruang bakar.



Gambar 2. 1. Skema sistem injeksi secara umum

Keterangan :

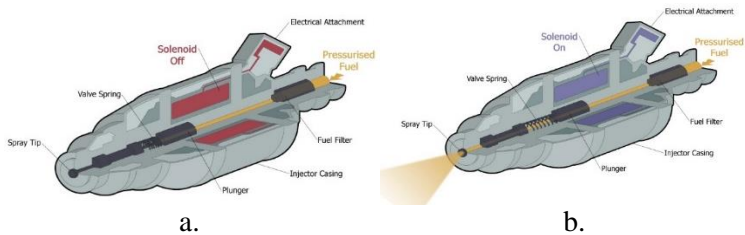
1. Pompa bahan bakar/ Fuel Pump
2. Fuel injektor

3. Ignition coil
4. Throttle body
5. ECU
6. Oksigen sensor
7. Crank position sensor

2.2 Injektor

Salah satu komponen kunci dari sistem injeksi bahan bakar ini adalah injektor. Injektor adalah alat yang menyembrotkan bahan bakar sebelum/saat masuk ke *engine* dengan penyemprotan bertekanan tinggi. Hasil dari penyemprotan bahan bakar ini adalah ukuran butir *spray* bahan bakar bisa menjadi lebih kecil dibanding dengan menggunakan sistem karburator, khususnya saat *fully open throttle*. Hal ini dikarenakan penggunaan tekanan tinggi untuk menyembrotkan bahan bakar dan independensi kerja dari injektor yang menyembrotkan bahan bakar terhadap laju udara yang memasuki *engine*. Dengan fakta tersebut bisa dipahami bahwa dengan adanya injektor mampu memperbaiki kemudahan bahan bakar untuk bercampur dengan udara.

Dalam perkembangan injektor, injektor yang pertama kali diciptakan bekerja secara mekanis. Injektor sistem mekanis bekerja dengan pompa bahan bakar mekanis dan kerja buka tutup injektor yang dikontrol oleh mekanisme pegas yang menahan katup nosel injektor. Lalu setelah model mekanis, injektor yang bekerja secara elektronik mulai ditemukan dan terus dikembangkan. Injektor sistem elektronik secara umum sudah memakai kontrol elektronik mulai dari pompa bahan bakar hingga ke mekanisme buka tutup injektornya. Untuk injektor bermekanisme elektrik, kerja buka tutup injektor disebabkan oleh perangkat solenoid pada bagian dalam injektor yang menghasilkan gaya magnet saat diberi tegangan listrik dan menarik katup nosel injektor untuk membuka [7]. Ilustrasi dari kerja injektor sistem elektronik bisa ditunjukkan pada gambar 2.2 :

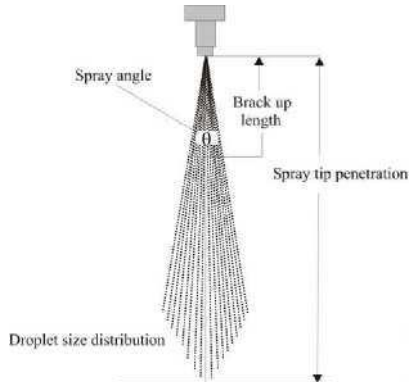


Gambar 2. 2. Ilustrasi dari kerja injektor sistem elektronik saat injektor keadaan off (a) dan saat injektor keadaan on (b)

2.3 Karakteristik Semprotan

Karakteristik semprotan bahan bakar dipengaruhi oleh *properties* fisik bahan bakar berupa densitas, viskositas. Untuk semprotan pada ruang terbuka (ambient atmospheric pressure), semakin tinggi *properties* fisik bahan bakar akan menghasilkan penetrasi semprotan yang semakin panjang. Sedangkan kenaikan tekanan dan temperatur ambient menyebabkan phase cairan semprotan menjadi lebih pendek dan tipis. Hal ini disebabkan oleh kenaikan momentum dan perpindahan panas droplet ke udara ambient. Secara garis besar, peninjauan karakteristik semprotan dibagi menjadi dua [8,9] , yaitu :

1. *Macroscopic characteristics*



Gambar 2. 3 Parameter fisik semprotan

Terdapat 3 karakteristik utama untuk menentukan kualitas semprotan yang dihasilkan injektor, yaitu :

a. Panjang Penetrasi

Panjang penetrasi semprotan didefinisikan sebagai panjang total semprotan dalam suatu kontrol volume. Panjang penetrasi semprotan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

1. Tekanan injeksi

Dengan meningkatnya tekanan injeksi maka akan menaikkan kecepatan semprotan, sehingga panjang penetrasi semprotan menjadi lebih panjang

2. Perbandingan densitas

Perbandingan anantara densitas bahan bakar dengan densitas udara mempengaruhi panjang penetrasi semprotan. Semakin besar nilai perbandingan densitas maka panjang penetrasi semprotan akan berkurang.

3. Temperatur kerja bahan bakar

Semakin tingginya temperatur bahan bakar maka densitas bahan bakar tersebut akan berkurang, hal ini akan menyebabkan panjang penetrasi semakin pendek.

b. Sudut Semprotan

Sudut semprotan merupakan sudut yang dibentuk oleh dua garis terluar semprotan, dari ujung injektor hingga jarak tertentu. Sudut semprotan menentukan distribusi bahan bakar pada ruang bakar. Dengan menaikkan sudut semprotan maka akan menurunkan panjang penetrasi dan dapat menyebabkan droplet keluaran lubang injektor yang menyatu dengan droplet keluaran lubang injektor yang lain (untuk kasus *multi-hole*). Sudut semprotan pada utamanya dipengaruhi oleh karakteristik geometri dari nozzle. Selain geometri dari nozzle sudut semprotan juga dipengaruhi oleh :

1. Tekanan Injeksi

Semakin tinggi tekanan injeksi menyebabkan sudut semprotan yang dihasilkan menjadi besar hingga nilai maksimal, ketika telah mencapai nilai maksimal sudut semprotan akan semakin mengecil.

2. Perbandingan densitas

Bertambahnya densitas pada bahan bakar menyebabkan kenaikan pada sudut semprotan karena adanya interaksi fluida dengan dinding nozzle. Menurut Arregle (1998) dan Naber & Siebers (1996) untuk perbandingan densitas bahan bakar dengan udara lebih dari 0.04 maka parameter perbandingan densitas tidak mempengaruhi besar kecilnya sudut semprotan.

3. Temperatur kerja bahan bakar

Semakin tingginya temperatur kerja suatu bahan bakar menyebabkan proses evaporasi semprotan pada daerah terluar semprotan menjadi lebih cepat. Hal ini menyebabkan sudut semprotan semakin kecil.

2. *Microscopic characteristics*

Tinjauan karakteristik semprotan secara mikro meliputi atomisasi semprotan menjadi butiran-butiran yang halus. Atomisasi ini penting karena berperan dalam penyatuan bahan bakar dengan udara agar terjadi pembakaran yang sempurna pada ruang bakar. Pada umumnya, bagus tidaknya atomisasi pada injeksi bahan bakar dapat diketahui dengan pendekatan *Sauter Mean Diameter*. *Sauter Mean Diameter* dapat digunakan untuk menghitung laju penguapan rata-rata dan sebagai perbandingan kualitas atomisasi dari bermacam-macam semprotan. Dari hasil pengukuran yang dilakukan oleh Hiroyasu, Arai dan Tabata (1989), untuk *low-pressure injector*, *Sauter Mean Diameter* dapat ditentukan dengan persamaan 2.1 [10] :

$$SMD = 4,12d \cdot Re^{0,12} We^{-0,75} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0,54} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0,18} \quad (2.1)$$

Bilangan Reynolds (Re) merupakan rasio antara gaya inersia (terhadap gaya viskos (μ/L) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen. Bilangan reynolds dirumuskan pada persamaan 2.2 berikut [11] :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (2.2)$$

Sedangkan Bilangan Weber merupakan rasio dari gaya inersia terhadap kekuatan tegangan permukaan yang dirumuskan pada persamaan 2.3 berikut :

$$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot d}{\sigma} \quad (2.3)$$

Keterangan :

SMD = *Sauter Mean Diameter*

d = diameter nozzle

Re = bilangan reynolds

We = bilangan weber

v = kecepatan bahan bakar

μ_f = viskositas dinamis bahan bakar

μ_g = viskositas dinamis udara

ρ_f = densitas bahan bakar

ρ_g = densitas udara

σ = tegangan permukaan

Salah satu parameter yang penting dalam *Sauter Mean Diameter* adalah distribusi ukuran droplet. Diameter droplet dapat dipengaruhi dari berbagai parameter [12], yaitu :

- a. Temperatur kerja bahan bakar

Semakin naiknya temperatur kerja bahan bakar akan menaikkan laju evaporasi dari bahan bakar itu sendiri. Temperatur bahan bakar yang tinggi akan menyebabkan diameter droplet menjadi lebih kecil. Droplet dengan diameter yang lebih kecil cenderung untuk terjadi evaporasi secara sempurna dibandingkan droplet dengan diameter yang lebih besar.

- b. Perubahan spasial ukuran droplet

Ukuran rata-rata droplet cenderung untuk tumbuh karena kenaikan jarak antara droplet dan injektor. Pada beberapa penelitian disarankan bahwa nilai diameter rata-rata droplet lebih besar dari radius semprotan

- c. Perkembangan diameter droplet terhadap waktu

Pada umumnya hal ini mempertimbangkan diameter medium droplet menurun saat berada pada ujung semprotan dan meningkat pada saat berada pada dekat injektor, sedangkan pada saat berada jauh dari ujung injektor cenderung konstan. Pada umumnya, ukuran droplet cenderung kecil pada awal semprotan dan kemudian tumbuh.

d. *Properties* bahan bakar

Properties bahan bakar yang mempengaruhi diameter rata-rata droplet adalah tegangan permukaan, viskositas dan densitas. Tinggi rendahnya viskositas suatu bahan bakar sangat mempengaruhi ukuran droplet hingga dua kali lipat dari ukuran semula.

e. *Properties* udara

Properties udara yang berpengaruh yaitu tekanan dan temperatur. Penelitian membuktikan bahwa pengaruh tekanan ambien terhadap ukuran rata-rata butir. Menurut De Corso, *Sauter Mean Diameter* meningkat seiring meningkatnya tekanan ambien. Temperatur udara mempengaruhi atomisasi karena beberapa alasan. Pada tekanan konstan, temperatur udara mempengaruhi densitas udara. Pada densitas udara yang konstan, angka Weber tidak berpengaruh pada perubahan temperatur udara. Namun, jika perubahan pada temperatur udara menyebabkan temperatur bahan bakar juga berubah maka angka Weber akan dipengaruhi oleh perubahan tegangan permukaan. Kenaikan temperatur bahan bakar menyebabkan penurunan yang besar pada viskositas dan sedikit penurunan pada tegangan permukaan. Hal ini akan menyebabkan perbaikan pada kualitas atomisasi.

f. Tekanan Injeksi Bahan Bakar

Tekanan injeksi bahan bakar yang tinggi menyebabkan bahan bakar disemprotkan dari injektor dengan kecepatan yang tinggi. Hal ini menyebabkan kenaikan bilangan weber yang membuat atomisasi menjadi lebih halus.

2.4 Respon Buka-tutup Injektor

Bahan bakar harus disemprotkan pada waktu dan sudut engkol yang tepat. Salah satu indikator untuk mengetahui kualitas dari injektor adalah kepekaan dan ketepatan buka-tutup *needle* injektor. Apabila bahan bakar terlambat disemprotkan maka akan menyebabkan kurangnya jumlah bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar karena katup intake akan menutup pada waktu tertentu sehingga pembakaran yang terjadi tidak setimbang karena kurangnya bahan bakar dan pembakaran menjadi miskin. Sedangkan apabila bahan bakar awal disemprotkan, bahan bakar akan mengembun sebelum semprotan mencapai ruang bakar. Injeksi lebih awal juga mengurangi emisi gas CO yang dihasilkan dari pembakaran. Untuk mengetahui respon buka tutup injektor dapat dicapai dengan cara memplot dari injektor mulai membuka hingga injektor menutup. Grafik berupa waktu injektor menyemprot terhadap laju massa bahan bakar yang disemprotkan. Kepekaan injektor dipengaruhi oleh gaya magnet solenoid dan viskositas bahan bakar. Apabila gaya magnet yang dibutuhkan untuk mengangkat *needle* dengan tekanan injeksi tertentu kurang akan menyebabkan terlambatnya injektor membuka. Sehingga laju alir massa bahan bakar yang disemprotkan akan berkurang. Sedangkan untuk menutup lubang injeksi(*needle* kembali ke posisi semula) dipengaruhi oleh viskositas bahan bakar. Semakin kecil viskositas bahan bakar maka *needle* cenderung lebih cepat kembali ke posisi semula. Ketika *needle* kembali ke posisi semula, gaya viskos akan melawan *needle* yang kembali ke posisi semula. Hal ini yang menyebabkan apabila bahan bakar yang memiliki viskositas tinggi mengakibatkan gaya viskos akan menghambat pergerakan *needle* yang menyebabkan *needle* memerlukan waktu lebih untuk kembali ke posisi semula dengan gaya magnet solenoid yang sama. [13]

2.5 Bahan Bakar

2.5.1 Gasoline

Motor bensin dirancang dengan menggunakan bahan bakar *fossil fuel* yang diperoleh dari distilasi pendidihan minyak mentah (*crude oil*) pada temperatur 30°C sampai 200°C. Hidrokarbon yang terdapat didalamnya antara lain *paraffin*, *naphthalene*, *olefin*, dan *aromatic* dengan jumlah karbon yang bervariasi mulai dari 12 sampai 18.

Menurut Blackmore dan Thomas (1977), ada dua karakteristik utama dari bahan bakar gasolin ini yaitu volatilitas dan angka oktan. Volatilitas adalah salah satu karakteristik bahan bakar yang menentukan persentase volume bahan bakar yang menguap pada rentang temperatur tertentu. Jika gasolin terlalu volatil, ketika digunakan pada temperatur ambien yang tinggi, gasolin cenderung menguap pada saluran bahan bakar pada *engine* dengan karburator dan terjadi *vapour locks*, yang menyebabkan penurunan laju aliran bahan bakar pada saluran bahan bakar. Namun jika bahan bakar tidak cukup volatil, maka *engine* akan kesulitan untuk menyala, terutama untuk start dingin. Untuk volatilitas, bisa dilihat dari titik didih dari bahan bakar itu. Sementara itu, angka oktan suatu bahan bakar menunjukkan kemampuan *anti-knock* dari bahana bakar tersebut. Skala 0-100 didefinisikan sebagai nilai dari 0 untuk n-heptana (pemicu *knock*) dan nilai 100 untuk iso-oktana (bahan bakar tahan *knock*). Contoh untuk bahan bakar okta 95 memiliki performa yang ekuivalen dengan campuran dari 95% iso-oktana dan 5% n-heptana. Kebutuhan angka oktan bahan bakar dari suatu *engine* bervariasi dengan rasio kompresi, pertimbangan geometrik dan mekanika, dan kondisi operasi. [14]

Properti bahan bakar adalah sifat atau karakter yang dimiliki oleh suatu bahan bakar yang terkait dengan kinerja bahan bakar tersebut dalam proses atomisasi dan pembakaran. *Properties* bahan bakar yang berpengaruh pada proses atomisasi pada semprotan yaitu :

1. Viskositas

Viskositas atau kekentalan dari suatu cairan adalah salah satu sifat cairan yang menentukan besarnya perlawanan terhadap gaya geser. Viskositas terjadi terutama karena adanya interaksi antara molekul-molekul cairan. Viskositas merupakan sifat penting dalam penyimpanan dan penggunaan bahan bakar. Viskositas mempengaruhi derajat pemanasan awal yang diperlukan untuk handling, penyimpanan dan atomisasi yang memuaskan dan jika viskositas terlalu tinggi maka akan menyulitkan dalam pemompaan dan sulit untuk diinjeksi sehingga atomisasi bahan bakar menjadi jelek. Viskositas bahan bakar minyak sangat penting karena viskositas minyak sangat berkaitan dengan suplai konsumsi bahan bakar ke dalam ruang bakar dan juga sangat berpengaruh terhadap kesempurnaan proses pengkabutan (atomizing) bahan bakar melalui injektor. Bilamana Viskositas terlalu tinggi maka proses atomizing akan terganggu karena kecenderungan bahan bakar yang mempunyai viskositas tinggi akan sulit dikabutkan. Sedangkan untuk bahan bakar yang mempunyai viskositas rendah dapat menimbulkan gesekan (abrasive) dalam ruang bakar karena gerakan piston dalam prosesnya membutuhkan pelumasan, sehingga viskositas juga menggambarkan tingkat pelumasan dari bahan bakar. Secara logika, viskositas bahan bakar yang lebih tinggi memiliki tingkat pelumasan yang lebih baik.

2. *Density, Specific Gravity dan API Gravity*

Density didefinisikan sebagai perbandingan massa bahan bakar terhadap volume bahan bakar pada temperatur acuan 15°C atau 60°F. Sedangkan Specific Gravity (SG) didefinisikan sebagai perbandingan berat dari sejumlah volume minyak bakar terhadap berat air untuk volume yang sama pada temperatur tertentu densitas bahan bakar, relatif terhadap air. Specific Gravity dinyatakan dalam persamaan:

$$SG_{\text{terhadap air}} = \frac{\text{densitas}_{\text{bahan bakar}}}{\text{densitas}_{\text{air}}}$$

Sementara hubungan nilai Specific Gravity dengan API Gravity adalah sebagai berikut :

$$\text{API Gravity} = \frac{141,5}{\text{SG at } 60^{\circ}\text{F}} - 131,5$$

3. Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan suatu zat cair didefinisikan sebagai gaya tiap satuan panjang. Jika pada suatu permukaan sepanjang ℓ bekerja gaya sebesar F yang arahnya tegak lurus pada ℓ , dan menyatakan tegangan permukaan. Pada umumnya nilai tegangan permukaan zat cair berkurang dengan adanya kenaikan temperatur.

2.5.2 Bioetanol

Bioetanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) adalah cairan biokimia dari proses fermentasi gula dari sumber karbohidrat menggunakan bantuan mikroorganisme. Bioetanol memiliki potensi untuk digunakan sebagai alternatif bahan bakar minyak bumi untuk tujuan mengurangi total emisi CO_2 dari mesin pembakaran dalam. sifat-sifat bioetanol antara lain memiliki nilai oktan yang tinggi dan entalpi penguapan yang tinggi dibandingkan dengan bensin standar, yang memungkinkan untuk penggunaan rasio kompresi tinggi dan kemungkinan lebih meningkatkan waktu penyalaan , serta membuat efisiensi engine meningkat.

Etanol dapat diproduksi dari bahan baku selulosa seperti jagung, jerami padi, tebu, kayu, dan limbah perkotaan. Bioetanol merupakan bahan bakar terbarukan yang ramah lingkungan. Pemanfaatan etil alcohol sebagai bahan bakar adalah untuk mengurangi konsumsi minyak mentah sekaligus pencemaran lingkungan. Dengan penggunaan bioetanol akan mengurangi efek rumah kaca. Jika etanol hasil dari biomassa digunakan untuk kendaraan bermotor, maka emisi CO_2 akan berkurang 7% dari kendaraan yang sama yang menggunakan bahan bakar gasoline.

2.5.3 Perbandingan Karakteristik Bahan Bakar Gasoline dan Bioetanol E100

Tabel 2.1 dibawah ini menjelaskan tentang karakteristik bahan bakar gasoline dan bioetanol E100. Gasoline yang mempunyai angka oktan 95 atau setara dengan Pertamina Plus.

Tabel 2. 1 Karakteristik Bahan Bakar Gasoline dan Bioetanol E100[15]

<i>Properties Bahan Bakar</i>	Bioetanol	Gasolin
Densitas [kg/m^3] (20 °C)	789,67	718,33
Viskositas [cP] (25 °C)	1.57	0.84
Tegangan permukaan [mN/m] (20°C)	27	24
Kalor penguapan laten [MJ/kg] (25 °C)	0.902	0.364
Titik didih [°C]	78.5	30-190
<i>Research Octane Number</i> (RON)	129	95

Dari data karakteristik bahan bakar tabel 2.1, terdapat beberapa perbedaan nilai untuk jenis karakteristik tertentu. Beberapa perbedaan ini seperti nilai densitas, nilai kalor pembakaran, kalor penguapan, dll. Tiap perbedaan nilai karakteristik akan mempengaruhi beberapa hal, seperti unjuk kerja bahan bakar terhadap suatu *engine*, emisi gas sisa pembakaran, serta kemudahan penyalaan bahan bakar terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Beberapa cara yang dilakukan untuk menyiasati efek perbedaan karakteristik ini antara lain dengan dengan pemetaan ulang untuk durasi injeksi, pemetaan sudut pengapian, memvariasikan rasio kompresi *engine* seperti penelitian Gayuh dan Renno (2016). Untuk emisi gas sisa pembakaran, secara umum didapatkan penurunan emisi gas buang dikarenakan adanya oksigen pada senyawa etanol yang bisa mengurangi terbentuknya senyawa CO akibat kurangnya oksigen dalam pembakaran atau diakibatkan pembakaran yang kurang sempurna. Untuk kemudahan penyalaan bahan bakar terhadap

kondisi ekstrem, didapatkan fakta bahwa untuk temperatur ambien yang cukup dingin, bahan bakar bioetanol mengalami kesulitan nyala akibat titik didih dan kalor penguapan yang lebih besar dibanding gasolin, dari hasil penelitian Gayuh dan Renno (2016). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, Nicky (2017) menggunakan perangkat pemanas bahan bakar berprinsip induksi elektromagnetik pada saluran bahan bakar sebelum injektor. Rezende dan Moreira (2012) mengatasi permasalahan kesulitan penyalan bahan bakar bioetanol ini dengan membuat pemanas induksi elektromagnetik yang diletakkan pada *nozle tip* (ujung nosel) injektor.

2.5.4 Analisa Permasalahan dan Solusi Penyalan Bahan Bakar Bioetanol pada Temperatur Ambien Rendah

Pada pembahasan terkait perbedaan karakteristik bahan bakar antara gasolin dan bioetanol E100, terdapat beberapa perbedaan nilai untuk satu jenis karakteristik bahan bakar tertentu, beberapa perbedaan nilai karakteristik yaitu titik didih dan kalor penguapan. Efek dari perbedaan nilai karakteristik ini adalah jika titik didih bahan bakar terlalu tinggi, maka bahan bakar tersebut sulit menguap pada temperatur ambien yang rendah. Lalu dengan tingginya kalor penguapan bahan bakar maka bahan bakar tidak bisa menguap dengan sendirinya tanpa diberikan kalor masukan ke bahan bakar tersebut.

Maka dari permasalahan kesulitan penyalan awal bahan bakar bioetanol ini, sudah dilakukan beberapa cara untuk menanggulangi permasalahan ini. Beberapa solusi yang pernah dilakukan, seperti yang tercantum pada penelitian Rezende dan Moreira (2012) antara lain [3] :

1. Start dingin menggunakan tangki tambahan berisi gasolin
Teknik ini menggunakan tangki tambahan berisi gasolin yang berfungsi sebagai bahan bakar awal untuk menyalakan *engine*. Saat sudah tercapai temperatur kerja *engine*, maka bahan bakar yang masuk ke *engine* diganti secara perlahan dari gasolin ke bioetanol. Teknik penggantian bahan bakar

ini bisa dilakukan secara manual dengan kontrol dari manusia atau dilakukan secara otomatis dengan kontrol elektronik. Kelebihan dari sistem ini adalah kontrol sistem ini bisa dilakukan secara manual ataupun secara otomatis sehingga biaya pembuatan sistem bisa bervariasi. Lalu variasi penyusunan komponen-komponennya bisa beragam, menurut Rezende dan Moreira (2012) bisa menggunakan tangki tambahan, pompa tambahan, katup solenoid 2 atau 3 arah, dan sistem perpipaan yang mengarah ke injektor tambahan. Sementara itu kekurangan dari penggunaan tangki tambahan ini adalah kesalahan pengoperasian sistem akibat dari faktor manusia, perlu dilakukan pemeriksaan rutin untuk selalu menjaga level dari gasolin, kemudian apabila sistem tidak pernah diaktifkan untuk waktu yang lama, rawan terjadi penyumbatan saluran bahan bakar akibat penuaan bahan bakar.

2. Metode *Flexible-Fuel*

Metode ini menggunakan kontrol elektronik yang mengenali bahan bakar yang akan masuk ke *engine*, mulai dari gasolin, bioetanol, atau campuran dari kedua bahan bakar ini. Kontrol elektronik ini mempunyai algoritma yang mampu mengenali terhadap jenis bahan bakar yang akan masuk ke *engine*. Secara umum sistem ini bekerja dengan membaca bahan bakar apa yang dimasukkan ke *engine*, baik pada saat sistem pertama kali dihidupkan dan saat dilakukan pengisian bahan bakar. Hasil dari pembacaan kontrol elektronik ini akan mengatur dari parameter pembakaran bahan bakar di *engine*, seperti pengapian dan perbandingan udara dan bahan bakar, agar tercapai kondisi operasi yang optimal. Teknik yang digunakan untuk mengetahui isi atau komposisi dari bahan bakar ini bisa menggunakan sensor oksigen (sensor Lambda) atau menggunakan sensor etanol (sensor *flex-fuel*)

3. Pemanasan Induktif pada Ujung Injektor

Metode ini menggunakan injektor seperti yang biasa digunakan dan mempunyai prinsip kerja yang sama. Yang

membedakan dari injektor yang sudah ada adalah perlengkapan pemanasan induktif yang dipasang pada ujung injektornya. Induksi elektromagnetik akan menghasilkan panas yang selanjutnya memanasi dinding dalam dari pemanas induktif yang kontak dengan bahan bakar yang keluar dari injektor. Tujuan dari penggunaan alat ini adalah untuk menguapkan bahan bakar yang keluar dari injektor.

2.6 Injektor Bioetanol dengan Pemanas Induktif

Setelah dijelaskan secara umum tentang beberapa solusi untuk mengatasi permasalahan kesulitan penyalaan awal bahan bakar bioetanol E100 dengan temperatur ambien yang rendah, maka dibuat sistem pemasukan bahan bakar yang mampu mengatasi permasalahan kesulitan penyalaan awal bahan bakar Bioetanol E100. Cara yang ditempuh dalam penelitian ini yaitu dengan menggunakan pemanas induktif pada ujung injektor.

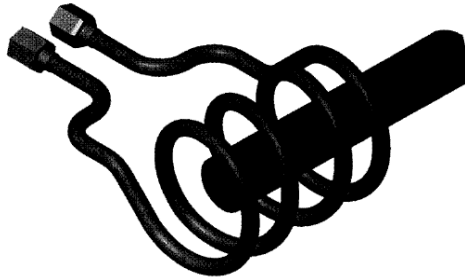
Injektor dengan pemanas induktif dipilih sebagai alternatif solusi untuk permasalahan kesulitan penyalaan awal bahan bakar bioetanol E100. Untuk solusi tangki tambahan berisi gasolin, pernah digunakan dalam penelitian Gayuh dan Renno (2016) untuk penelitian mereka. Untuk solusi *flexible-fuel*, berdasarkan penelitian dari Martin et al (2014) didapatkan bahwa sistem *flexible-fuel* kurang menguntungkan bila dipadukan dengan penggunaan etanol yang memiliki sejumlah kadar air, menyebabkan peningkatan kadar emisi gas buang dan tingkat konsumsi bahan bakar yang paling tinggi dibanding bahan bakar gas alam dan gasolin.

Injektor bioetanol ini secara umum memiliki bagian utama injektor yang sudah ada seperti injektor gasolin, namun dengan penambahan sistem pemanas. Tujuan sistem pemanas ini adalah untuk memanasi bahan bakar yang keluar dari injektor agar bahan bakar berubah fase menjadi uap, yang memudahkan homogenisasi bahan bakar dengan udara sebelum masuk ke *engine*. Sistem pemanas ini bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik yang menyebabkan panas yang selanjutnya

memanasi dinding dalam pemanas dan memindahkan panas dari dinding pemanas menuju ke bahan bakar dengan konveksi.

Bahan bakar mengalir melewati zona solenoid injektor. Lalu kemudian bahan bakar menuju ke bagian ujung *nozle* injektor yang telah dilengkapi pemanas induksi. Bahan bakar akan menerima panas dari elemen pemanas secara konveksi. Lalu bahan bakar akan disemprotkan oleh injektor ketika sudah diberikan sinyal dari unit kontrol injeksi.

2.7 Pemanas Induksi



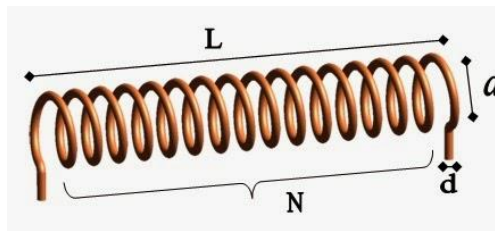
Gambar 2. 4 Kumparan induksi sederhana

Pemanas induksi adalah tipe pemanas menggunakan kumparan metal yang dialiri listrik untuk membangkitkan Eddy current dan mengeluarkan panas. Tegangan listrik dialirkan menuju ke kumparan induksi (contoh : koil solenoid) akan menghasilkan arus listrik pada rangkaian koil, arus listrik yang timbul akan mengeluarkan pada sekitar kumparan medan magnet yang berlaku fungsi waktu yang mempunyai frekuensi yang sama dengan arus kumparan. Medan magnet ini menciptakan eddy currents pada pusat kumparan. Eddy currents yang tercipta ini juga menciptakan panas sebagai akibat efek Joule. Pemanas induksi secara konvensional ditunjukkan pada gambar 2.4

Karena menggunakan prinsip elektromagnet, distribusi arus pada kumparan induktor dan benda kerja tidak seragam. Ketidakteraturan distribusi arus menyebabkan

ketidakseragaman distribusi temperatur pada benda kerja. Ketidakseragaman distribusi arus ini bisa disebabkan oleh beberapa fenomena elektromagnet, seperti efek permukaan, efek proximity, dan efek cincin. Efek efek ini tersebut berperan penting dalam memahami fenomena pemanasan induksi.

Terdapat beberapa formula untuk mengalkulasi pemanas induksi, terutama untuk dimensi pemanas induksi dan kebutuhan daya dari pemanas induksi ini. Pada dimensi, terdapat beberapa rumus yang saling terkait, mulai dari dimensi bahan hingga dimensi akhir pemanas. Untuk menghitung keperluan daya dari pemanas induksi, ditentukan dari karakter bahan yang dipanasi oleh pemanas induksi. Pada gambar 2.5 mencantumkan struktur sederhana dari pemanas induksi dan ditunjukkan dengan keterangan tiap bagian.[16]



Gambar 2. 5 Kumbaran pemanas induksi, (ket. : L : Panjang Inductor, a : jari-jari inti induktor, d : ukuran diameter kawat penyusun induktor, N : jumlah lilitan kawat)

Setelah mengetahui terkait penentu dimensi pemanas, maka dihitung jumlah lilitan pemanas induksi. Rumusnya adalah :

$$N_n = \frac{L}{D}$$

Jumlah total panjang kawat yaitu keliling pemanas induksi dikalikan dengan jumlah lilitan kawat.

$$l_n = 2\pi a \cdot N_n$$

Sementara itu untuk mengetahui kebutuhan daya dari pemanas induksi, bisa memakai rumus dibawah ini [17] :

$$P_w = mc \frac{T_f - T_s}{t}$$

Keterangan :

P_w : daya yang diperlukan pemanas;

m : massa dari benda yang dipanasi, kg

c : nilai rata-rata panas spesifik benda yang dipanasi, $J/kg^{\circ}C$

T_f : temperatur akhir pemanasan,

T_s : temperatur awal sebelum dipanasi pemanas, $^{\circ}C$

t : waktu yang diperlukan untuk proses pemanasan benda kerja, detik.

2.8 Solenoid

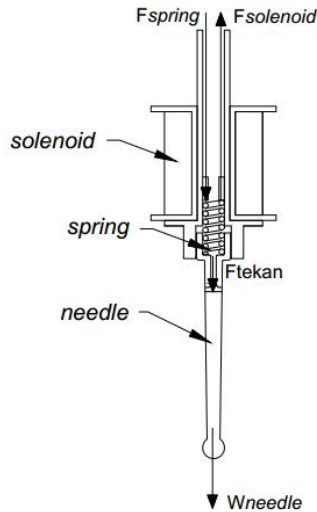
Bagian penting dari injektor, khususnya injektor elektronik, terletak pada bagian solenoid injektor. Bagian ini berisi kumparan yang terbuat dari kabel/ kawat metal yang dililitkan secara rapat. Dari lilitan ini, terjadi elektromagnetik yang timbul dari interaksi arus pada tiap kumparan kawatnya. SSSaya yang bekerja pada solenoid dipengaruhi oleh tekanan kerja injektor. Perhitungan dilihat dengan perhitungan *needle* yang dikenai oleh tekanan injeksi bahan bakar, gaya pegas, berat *needle* dan berat *spring*. Keempat perhitungan tersebut dapat dirumuskan :

$$F_{\text{tekan}} = P \cdot A_{\text{needle}} \quad (2.10)$$

$$F_{\text{spring}} = k \cdot \Delta x \quad (2.11)$$

$$W_{\text{needle}} = m_{\text{needle}} \cdot g \quad (2.12)$$

$$W_{\text{spring}} = m_{\text{spring}} \cdot g \quad (2.13)$$



Gambar 2. 6 *Free-body Diagram* Injektor

Dari Free-body Diagram diagram tersebut dapat diperoleh perumusan:

$$\Sigma F = 0$$

$$F_{\text{solenoid}} - (F_{\text{tekan}} + F_{\text{spring}} + W_{\text{needle}} + W_{\text{spring}}) = 0 \quad (2.14)$$

Dari perumusan 2.14 maka didapat gaya angkat solenoid minimal untuk mengangkat *needle* dengan tekanan tertentu adalah :

$$F_{\text{solenoid}_1} = (P \cdot A_{\text{needle}}) + (k \cdot \Delta x) + (m_{\text{needle}} \cdot g) + (m_{\text{spring}} \cdot g) \quad (2.15)$$

Gaya solenoid sendiri bisa didapat dari:

$$F_{\text{solenoid}_2} = \frac{(NI)^2 \cdot \mu_0 \cdot A_{\text{solenoid}}}{2t^2} \quad (2.16)$$

Dari rumus 2.15 dan 2.16 didapatkan hasil :

$$F_{\text{solenoid}_1} = F_{\text{solenoid}_2} \quad (2.17)$$

$$(P \cdot A_{\text{needle}}) + (k \cdot \Delta x) + (m_{\text{needle}} \cdot g) + (m_{\text{spring}} \cdot g) = \frac{(NI)^2 \cdot \mu_0 \cdot A_{\text{solenoid}}}{2t^2} \quad (2.18)$$

Jadi untuk mendapatkan banyaknya lilitan kawat solenoid, didapat dari perumusan 2.18 :

$$N = \sqrt{\frac{[(P \cdot A_{needle}) + (k \cdot \Delta x) + (m_{needle} \cdot g) + (m_{spring} \cdot g)] \cdot 2t^2}{\mu_0 \cdot A_{solenoid}}} \cdot I \quad (2.19)$$

Dengan :

N = jumlah lilitan

P = tekanan injeksi

k = konstanta pegas (N/m)

Δx = perubahan panjang pegas (m)

m_{needle} = massa *needle* (kg)

m_{spring} = massa *spring* (kg)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

I = arus (Ampere)

$A_{solenoid}$ = luasan yang dikenai lilitan solenoid (m^2)

A_{needle} = luasan *needle* yang dikenai tekanan injeksi (m^2)

t = jarak antara *needle* dengan solenoid (m)

μ_0 = permeabilitas ruang hampa = $4 \cdot 10^{-7}$ (N/A²)

2.9 Kebutuhan Bahan Bakar mesin Sinjai 150cc

Kebutuhan bahan bakar untuk mesin Sinjai 150cc tiap putarannya dapat dilihat pada tabel 2.2. Pada tabel tersebut menjelaskan banyaknya *mass flowrate* mesin sinjai 150cc dengan bahan bakar bioetanol E100 produksi PT Enero dengan kemurnian 99,96%. Agar mesin dapat beroperasi secara normal maka diperlukan *mass flowrate* dengan jumlah tertentu. [4]

Tabel 2. 2 *Mass Flowrate* bahan bakar untuk Sinjai 150cc

Putaran (rpm)	\dot{m} bahan bakar (kg/s)
2000	0,000394
3000	0,000423
4000	0,000508

5000	0,000637
6000	0,000861
7000	0,001093
8000	0,001545

2.10 Penelitian Terdahulu

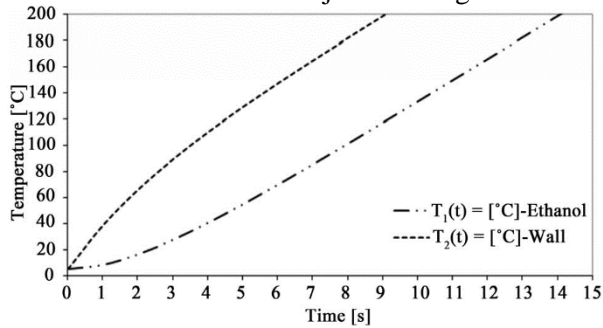
Beberapa penelitian terdahulu terkait mengatasi permasalahan kesulitan *cold-start* untuk motor bakar otto dengan bahan bakar bioetanol E100 adalah sebagai berikut :

2.10.1 *Thermal Modeling of a Novel Heated Tip Injektor for Otto Cycle Engines Powered by Ethanol*

Penelitian mengenai studi eksperimen ini dilakukan oleh **Alexandre Rezende** dan **Jose Roberto Simões-Moreira** (2012) [3] mengenai permodelan termal injektor yang telah diberi pemanas induksi untuk sistem penyalaan awal kendaraan bermotor. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengatasi permasalahan bahan bakar etanol yang sulit dinyalakan pada temperatur ambien rendah. Penelitian dilakukan dengan pendekatan permodelan termal dari dinding injektor yang dililit oleh kumparan induktor. Analisa termal yang digunakan adalah dengan metode *lumped analysis*. Dikarenakan panas dari induktor yang bekerja dengan fungsi waktu tertentu dan sudah diestimasi melalui angka Biot bahwa nilai Biot-nya adalah sebesar 0,01, masih sesuai dengan persyaratan *lumped analysis*. Temperatur yang diukur adalah temperatur etanol dan temperatur pemanas. Dan penelitian ini memvariasikan daya pemanas, rata-rata koefisien perpindahan panas, dan membandingkan antara *lumped solutions* dengan eksperimental.

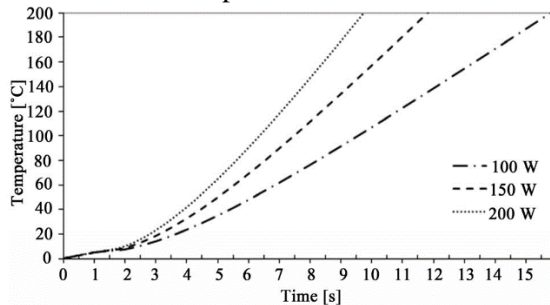
Hasil dari penelitian ini yaitu untuk perbandingan temperatur antara etanol dan dinding injektor, didapatkan bahwa temperatur dinding injektor lebih besar daripada temperatur

etanol pada tiap rentang waktu. Selisih perbedaan temperatur akan stabil ketika sistem sudah berjalan kurang lebih 7 detik.



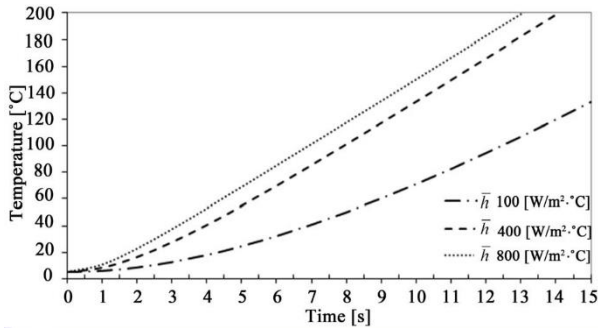
Gambar 2. 7 Grafik kenaikan temperatur dinding injektor dan etanol terhadap fungsi waktu

Kemudian untuk variasi daya pemanas induksi, didapatkan bahwa dengan semakin tinggi daya, kenaikan temperatur akan semakin cepat.



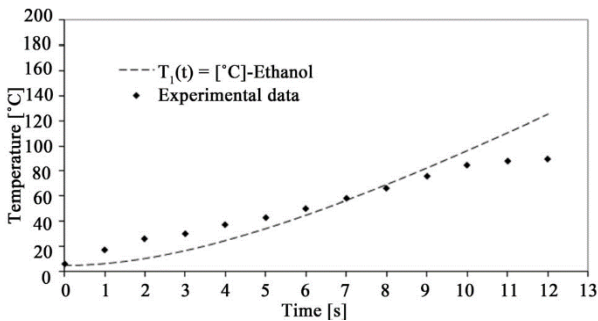
Gambar 2. 8. Grafik pengaruh daya pemanas terhadap fungsi waktu

Kemudian untuk variasi nilai koefisien perpindahan panas didapatkan dengan semakin tinggi koefisien perpindahan panas, maka kenaikan temperatur terjadi lebih cepat.



Gambar 2. 9. Grafik pengaruh nilai koefisien perpindahan panas terhadap fungsi waktu

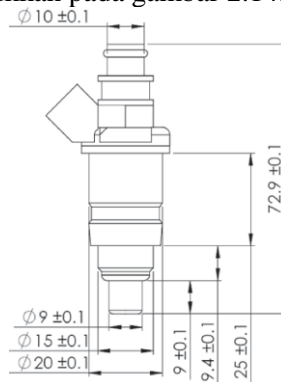
Untuk komparasi antara *lumped solutions* dan eksperimental didapatkan bahwa untuk 7 detik pertama data eksperimental nilai kenaikan temperatur lebih besar dibanding dengan *lumped solutions*. Dan ketika sudah melewati 7 detik awal ditunjukkan bahwa kenaikan temperatur dengan data eksperimental lebih kecil dibanding *lumped Solutions*.



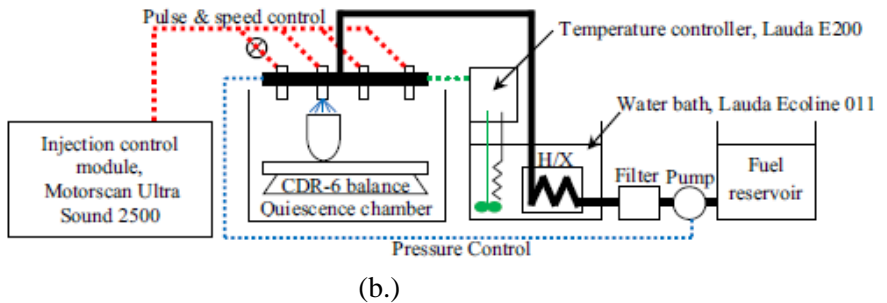
Gambar 2. 10. Grafik perbandingan metode eksperimen dibanding lumped solutions terhadap fungsi waktu

2.10.2 Effects of heated ethanol on retrofit single-hole gasoline injector performance

Penelitian ini dilakukan oleh **Sathaporn Chuepeng** (2012)[18]. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mencari performa injektor dalam hal laju aliran massa bahan bakar dan *discharge coefficient* ketika menggunakan injektor gasolin konvensional dengan dikenai temperatur pemanasan bahan bakar tertentu. Temperatur bahan bakar divariasikan dari 40 hingga 800C. Untuk parameter injektor, tekanan injeksi divariasikan dari 0,2 hingga 0,4 MPa. Kemudian untuk pengaturan *Injection pulse* dan *timing* injektor diset sebesar 120 Hz dan 60 min durasi injeksi untuk mengatur kerja injektor lubang tunggal dengan diameter lubang sebesar 0,34 mm. Penelitian ini dilakukan dengan cara menginjeksikan bahan bakar menuju bejana ukur berskala tertentu pada tekanan ambien atmosfer dan ditimbang untuk mendapatkan massa yang berguna untuk kalkulasi laju aliran massa bahan bakar etanol. Dari data laju aliran massa ini bisa digunakan untuk mencari nilai *discharge coefficient* dari injektor dengan bahan bakar etanol dengan asumsi *quasi steady*, *incompressible*, dan arah injeksi dijelaskan secara satu dimensi. Skema injektor dan penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2.14.

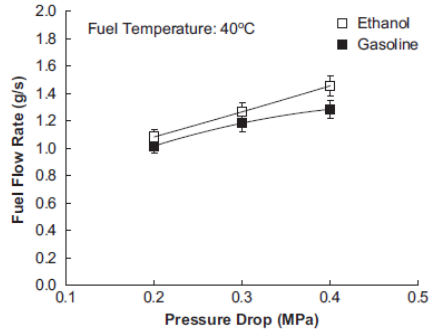


(a.)



Gambar 2. 11. a. Injektor yang akan diteliti, b. Skema penelitian

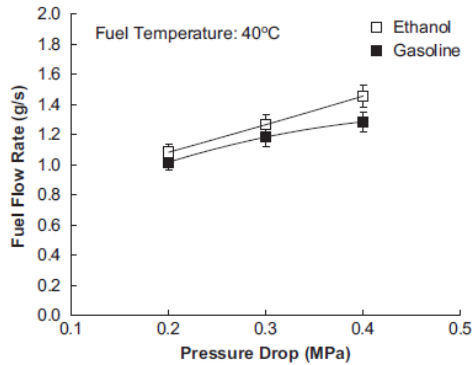
Hasil dari penelitian ini dengan kenaikan tekanan injeksi didapatkan kenaikan laju aliran massa dari bahan bakar. Dimana laju aliran massa bahan bakar terbesar didapatkan pada tekanan 0,4 MPa sebesar kurang lebih 1,4 g/s. Hasilnya bisa ditunjukkan pada gambar 2.15.



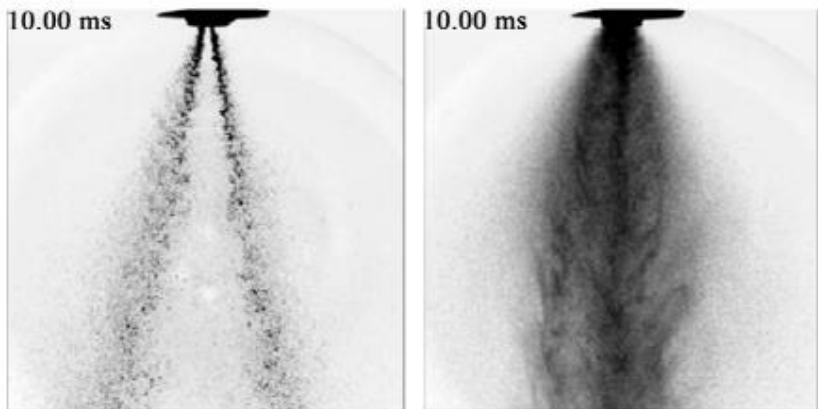
Gambar 2. 12. Hubungan antara tekanan injeksi dan laju aliran massa bahan bakar etanol

Untuk perbandingan laju aliran massa pada tiap temperatur, didapatkan laju aliran massa bahan bakar terbesar didapatkan pada temperatur bahan bakar 40°C. Lalu untuk

coefficient of discharge terbesar didapatkan pada temperatur 40°C. Hasil ini bisa ditunjukkan pada gambar 2.16



Gambar 2. 13. Hubungan antara pengaruh temperatur pemanasan terhadap laju aliran massa bahan bakar

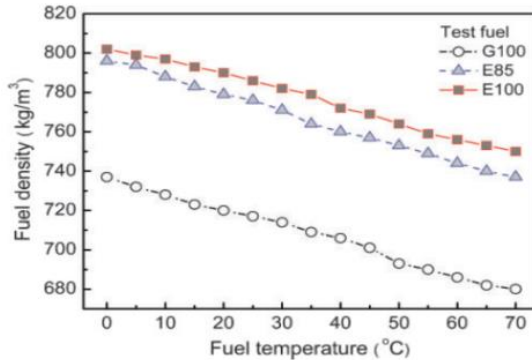


Pada gambar dapat dilihat perbandingan semprotan dengan dan tanpa pemanasan pada tekanan 4,2 bar pada temperatur 120 C.

Semprotan bahan bakar etanol pada temperatur 120 C dengan tekanan injeksi 4,2 bar kualitas uap yang dihasilkan mencapai 17%.

2.10.3 *Effect of undiluted bioethanol on combustion and emissions reduction in a SI engine at various charge air conditions*

Penelitian yang dilakukan oleh S H Yoon dkk (2009) [19] menunjukkan hasil pengukuran dari densitas bahan bakar dengan variasi temperatur dan uji bahan bakar (E100, E85, dan G100). Massa jenis E100 dan E85 jauh lebih tinggi dari G100, dan E100 mempunyai nilai densitas tertinggi dari bahan bakar yang diuji. Selain itu, dapat dilihat bahwa densitas bahan bakar uji menurun dengan linier seiring dengan meningkatnya kenaikan temperatur dari 0° C sampai 70° C (P 1atm).

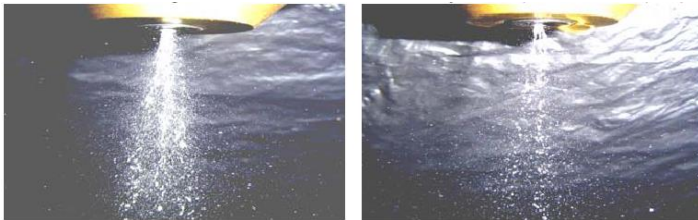


Gambar 2. 14. Hubungan antara temperatur bahan bakar terhadap densitas

Pada gambar 2.14 dapat disimpulkan bahwa dengan kenaikan temperatur bahan bakar etanol maka massa jenis akan semakin menurun. Hal ini yang menyebabkan jumlah atau debit bahan bakar etanol berkurang. Bahan bakar etanol tersebut menunjukkan bahwa nilai massa jenis untuk etanol lebih besar daripada massa jenis *gasoline*.

2.10.4 Study of injection parameters on performance and fuel consumption in a port injected gasoline engine with experimental and theoritical methods

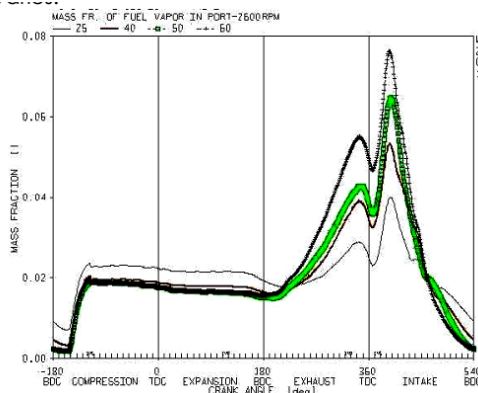
Ommi, Movahednejad, dan nekofar (2008) [5] melakukan penelitian tentang karakterisasi semprotan injektor dengan sistem pemasukan *port injection* yang digunakan pada motor otto pada variasi tekanan dan temperatur. Dari penelitian ini didapat bahwa semakin besarnya tekanan injeksi, kecepatan dan sudut semprotan semakin besar. Selain itu, semakin besarnya tekanan injeksi, diameter droplet yang dihasilkan menjadi semakin kecil. Sehingga atomisasi menjadi semakin lebih baik. *Pulse width* injeksi pada mesin seharusnya dikurangi karena kenaikan pada tekanan dan laju alir bahan bakar. Selain itu kenaikan tekanan injeksi mempengaruhi laju vaporisasi yang semakin tinggi karena diameter droplet menjadi semakin kecil sehingga kontak permukaan droplet dengan udara semakin besar yang berpengaruh pada meningkatnya laju injeksi. Sudut penyebaran semprotan semakin tinggi membuat semakin banyaknya bahan bakar yang mengenai *intake port*.



Gambar 2. 15. Pengaruh tekanan injeksi terhadap sudut semprotan (kanan : 2 bar, kiri 4 bar)

Pada variasi temperatur didapatkan hasil bahwa semakin naiknya temperatur maka tekanan uap bahan bakar pada droplet dan permukaan film bahan bakar semakin meningkat. Pada gambar 2.15 fraksi massa uap bahan bakar dan tekanan uap jenuh

bahan bakar pada katup *intake* berbeda pada variasi temperatur bahan bakar. Penguapan terjadi pada permukaan droplet bahan bakar sesaat ketika bahan bakar disemprotkan pada *port* dan panas yang dibutuhkan untuk menguapkan berasal dari droplet dan udara. Jika temperatur droplet bahan bakar lebih besar dari temperatur udara, kebutuhan panas untuk menguapkan droplet berasal dari droplet sendiri dan temperatur droplet akan turun dibawah temperatur udara sebelum droplet mencapai permukaan *port*. Pada kondisi ini temperatur film bahan bakar lebih kecil dari kondisi saat temperatur bahan bakar kurang dari temperatur udara dan perbedaan antara temperatur udara panas dan temperatur film bahan bakar yang rendah pada port bertambah. Maka hasil dari besarnya perpindahan panas dari udara ke film bahan bakar, temperatur udara berkurang dan terjad kenaikan pada temperatur bahan bakar pada titik tertentu menyebabkan temperatur campuran pada port berkurang. Disisi lain temperatur campuran bahan bakar dan udara mempengaruhi densitas dan laju alir massa campuran pada port dan variasi densitas campuran menyebabkan perubahan pada jumlah campuran yang masuk ke dalam ruang bakar. Hal ini mengakibatkan efisiensi volumetris menjadi bervariasi.



Gambar 2. 16. Grafik fraksi massa uap bahan bakar pada akhir katup intake terhadap variasi temperatur

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Pengujian dilakukan pada alat uji injektor Launch CNC-601A dengan temperatur bahan bakar tekanan dan durasi injeksi yang bervariasi. Pengujian dilakukan di Laboratorium Pembakaran dan Sistem Energi, Teknik Mesin ITS. Penelitian ini dibagi menjadi dua kelompok, yaitu :

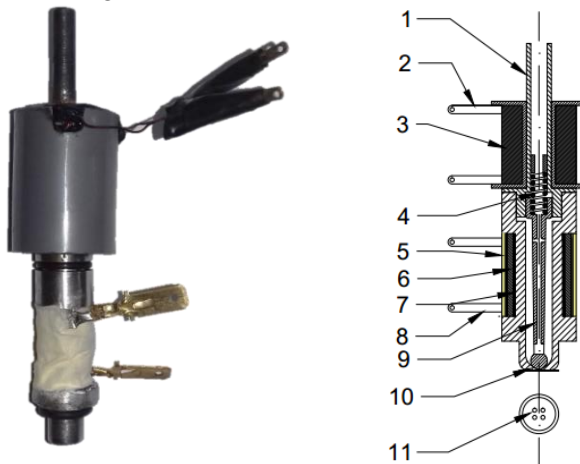
1. Kelompok kontrol adalah injektor standar yang menggunakan bahan bakar pertamax.
2. Kelompok uji adalah injektor modifikasi yang telah diberi pemanas dengan menggunakan bahan bakar bioetanol.

3.1 Peralatan Uji

Peralatan uji yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut :

3.1.1 Injektor Unit Test

Injektor yang digunakan pada penelitian ini memiliki spesifikasi sebagai berikut :



Gambar 3. 1 Injektor bioetanol E100

Keterangan :

1. Saluran masuk bahan bakar
2. Soket ECU
3. Kawat Solenoid
4. Pegas
5. Isolator
6. Magnesium Oksida
7. Kawat Nickelin
8. Soket pemanas
9. *Needle*
10. *Tip injector*
11. *Multi Hole*

Tabel 3. 1 Spesifikasi Injektor yang digunakan

Dimensi	Panjang	79 mm
	Diameter	18 mm
Jumlah lubang	4	
Diameter nozzle	0,2 mm	
Material	Sambungan bawah	Stainless steel
	Sambungan atas	Low Carbon Steel
	Needle	Kuningan
	Pemanas	Nikelin
	Solenoid	Tembaga
Tekanan kerja	5 bar	
Temperatur kerja maksimal pemanas	400°C	

3.1.2 Injector Tester Unit

Injector Tester Unit digunakan untuk proses pembersihan injektor kendaraan bermotor dan melihat kemampuan kerja serta karakteristik injektor dengan diberikan berbagai parameter kerja. *Injector Tester Unit* yang digunakan adalah Launch CNC-601A. Spesifikasi *Injector Tester* Launch CNC 601-A adalah sebagai berikut :



(a)



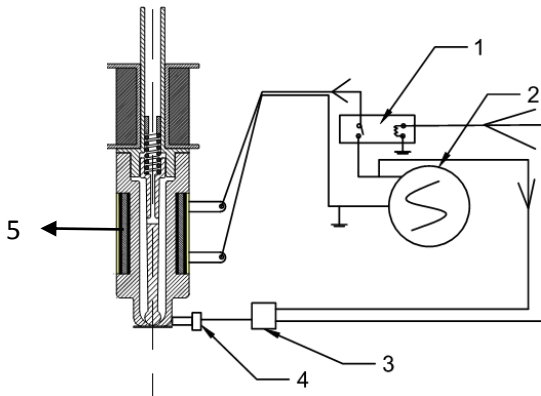
(b)

Gambar 3. 2 Injektor Tester (a) dan tampilan *controller* (b)

- Dimensi alat : 500mm×580mm×1400 mm
- Tegangan suplai : 220V , 50 Hz
- Daya unit utama : 280 W
- Daya *ultrasonic cleaner* : 100 W
- Rentang simulasi RPM : 10-9990 rpm; interval: 10 rpm;
- Rentang waktu operasi : 1-9999s
- *Injection pulse width* : 0,5-25ms; step: 0,1ms
- Kapasitas tangki bahan bakar: 4700ml
- Berat total alat : 95kg

3.1.3 *Electromagnetic Induction Heater*

Electromagnetic Induction Heater merupakan alat untuk memanaskan bahan bakar yang berupa gulungan kawat nikelin dimana voltase dan arus yang dilewatkan di gulungan berasal dari baterai motor. Pemanas digunakan untuk memanaskan bioetanol pada saat di injektor sehingga didapatkan temperatur bioetanol sesuai dengan yang diinginkan. Sistem pemanasan dari pemanas ini adalah pemanas pada injektor dipanaskan sampai temperatur yang diinginkan, sehingga thermostat akan mengirimkan sinyal untuk mematikan pemanas jika temperatur telah sesuai dengan yang dikehendaki dan aktuatur menggunakan sistem relay. Maka temperatur bahan bakar bioetanol yang mengalir keluaran injektor akan sesuai dengan yang diinginkan. Adapun skema *heater* seperti gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3. 3 Skema model injektor bioetanol E100

Keterangan :

1. *Relay*
2. *Sumber DC (Accu)*
3. *Controller*
4. *Thermostat*
5. *Pemanas*

3.1.4 Kamera *Slow motion*

Kamera ini bertujuan untuk mendokumentasikan hasil semprotan injektor dengan bahan bakar bioetanol yang telah dipanaskan dengan berbagai tekanan :



Gambar 3. 4 Kamera GoPro Hero 5

Spesifikasi Kamera GoPro Hero 5 :

- 12MP / 30 FPS Burst Time Lapse
- 4K 30fps/1440p 80fps/ 1080p 120fps
- Waterproof 33ft (10m)
- Simple One-Button Control
- WIFI + Bluetooth
- Advanced Wind Noise Reduction
- Voice Control
- Video Stabilization
- Touch Display
- Auto-upload to Cloud
- Location Capture
- RAW + WDR Photos

3.2 Bahan Bakar Uji

Bahan bioetanol yang digunakan merupakan produksi dari PT Enero dengan kemurnian 99,6 % dan tidak dijual bebas dipasaran.

3.3.2 Pengujian Properties Bahan Bakar

Pengujian dilakukan dengan uji densitas dan viskositas yang temperaturnya di variasikan dari 60, 70 dan 80 °C.

1. Uji Densitas

Pengujian densitas dilakukan di laboratorium Pembakaran dan Sistem Energi, ITS Surabaya, dengan menggunakan picnometer. Berat picnometer 15,72 g dan dengan volume 25 ml.



Gambar 3. 6 Peralatan Uji densitas

Prosedur pengujian:

- Timbang berat picnometer kosong dengan tombangan digital dan ditetapkan sebagai W_0 (berat awal).
- Isi picnometer dengan sampel uji yang telah dipanaskan hingga nampak cairan sampel yang keluar dari lubang teratas pada tutup picnometer, kemudian bersihkan dengan tisu pembersih permukaan picno meter yang basah.
- Timbang kembali dengan menggunakan timbangan sebelumnya berat picnometer yang telah terisi sampel dan ditetapkan sebagai w_1 .
- Menghitung nilai densitas dengan menggunakan rumus:

$$\rho = \frac{w_1 - w_0}{V} \text{ (g/ml)}$$

Dengan :

- ρ = densitas (g/ml)
- w_1 = berat picnometer yang berisi sampel uji (g)
- w_2 = berat picnometer tanpa sampel uji (g)
- V = volume sampel uji dalam picnometer (ml)

2. Uji Viskositas

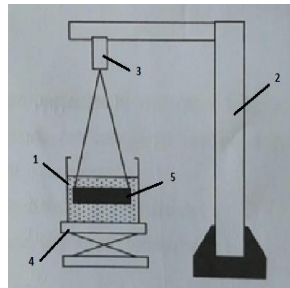
Pengujian nilai viskositas dilakukan di laboratorium Pembakaran dan Sistem Energi ITS Surabaya. Proses pengambilan nilai viskositas diawali dengan memanaskan sampel uji hingga temperatur tertentu, dalam pengujian ini temperatur divariasikan dari 60, 70, dan 80°C. kemudian menuangkan sampel tersebut kedalam gelas uji sampai mencapai garis pembatas gelas. kemudian pasang *viscotester*, pastikan bagian pengaduk terendam oleh sampel uji. Nyalakan viscotester dan tunggu putaran stabil dan hasil pengukuran dapat terbaca. Satuan yang tertera pada *viscotester* adalah dPa s.



Gambar 3. 7 Peralatan pengukuran viskositas

3. Uji Tegangan Permukaan

Pengujian nilai tegangan permukaan dilakukan di laboratorium Pembakaran dan Sistem Energi ITS. Sampel uji berupa bioetanol dengan variasi temperatur 50, 60 dan 70 °C. Skema peralatan ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3. 8 Skema Peralatan Uji Tegangan Permukaan

Keterangan :

1. Gelas Uji
2. Batang besi
3. *spring balance* skala Newton
4. Laboratory (dongkrak)
5. Cincin Aluminium

Tahapan Pengambilan Tegangan Permukaan

1. Peralatan uji disusun sesuai dengan skema pengujian
2. Panaskan cairan uji sesuai temperatur pengujian dan masukan cairan tersebut ke dalam gelas uji
3. Dongkrak dinaikkan dengan memutar skrup pengatur ketinggian meja dongkrak dan pastikan cincin aluminium terendam oleh cairan uji.
4. Nilai gaya awal (F_0) pada *spring balance* dicatat.
5. Ketinggian dongkrak diturunkan dengan memutar skrup pengatur sehingga cincin aluminium akan tertarik oleh cairan.
6. Ketika cincin aluminium berada pada titik kritis (kondisi hampir terlepas dari cairan) nilai tegangan akhir (F_1) dicatat.
7. Nilai tegangan permukaan bioetanol dihitung dengan cara mengolah data hasil pengujian yang diperoleh.

Persamaan untuk memperoleh nilai tegangan permukaan :

$$\alpha = \frac{\Delta F}{\ell} = \frac{F_1 - F_0}{\pi \cdot (d_1 + d_2)}$$

F_1 : gaya cincin pada titik kritis (mN)

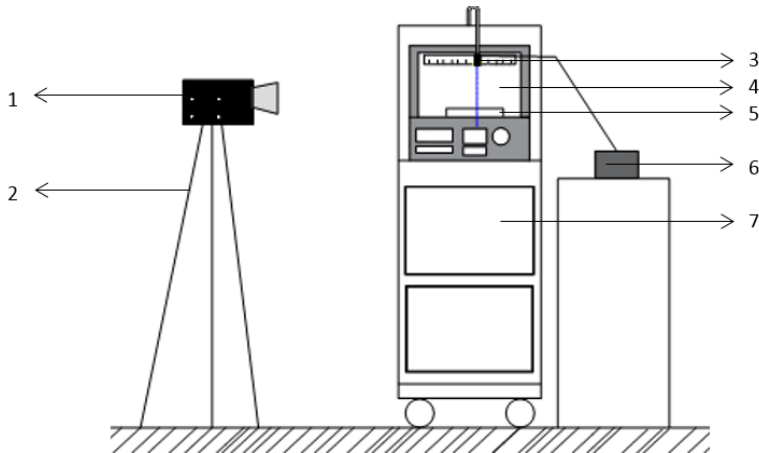
F_0 : gaya cincin saat terendam bioetanol (mN)

ℓ : panjang permukaan (m)

α : tegangan permukaan (mN/m)

d_1 : diameter dalam cincin (m)

d_2 : diameter luar cincin (m)



Gambar 3. 9 Peralatan Uji Visualisasi semprotan

Keterangan :

1. Kamera
2. Tripod
3. Injektor
4. *Black Screen*
5. Wadah penampung bahan bakar yang disemprotkan
6. Kontrol Panas
7. *Injector Tester*

3.3.3 Pengujian Karakteristik Semprotan

Prosedur pengujian merupakan rangkaian tahapan yang harus dilakukan mulai dari persiapan sampai selesainya pengujian. Adapun prosedur pengujian ini adalah sebagai berikut:

3.3.3.1 Persiapan Pengujian

1. Memeriksa kondisi kesiapan dari *injektor tester* meliputi kondisi kelengkapan perangkat yang ada di *injektor tester*. Menghubungkan alat *injektor tester* dengan catu daya listrik 220V 50 Hz
2. Memeriksa kondisi injektor yang akan digunakan, apakah terdapat kebocoran dan pemanas bisa bekerja dengan temperatur yang diinginkan

3. Memasang injektor ke tempat *test place* dari *injektor tester*.
4. Menyiapkan alat dokumentasi semprotan injektor.
5. Mempersiapkan alat tulis dan lembar data untuk mencatat data yang diukur.

3.3.3.2 Pengujian Karakteristik Semprotan Injektor Standar tanpa Pemanas Induksi

Langkah-langkah pengujian karakteristik semprotan injektor dengan pemanas induksi ini adalah :

1. Memasang injektor pada *injector tester*
2. Menyalakan alat *injektor tester*.
3. Untuk *item selection*, memilih *Uniformity/Sprayability Test* pada *item selection*.
4. Mengatur parameter tekanan injeksi bahan bakar dengan menekan tombol *increase pressure* hingga didapat tekanan sebesar 3 bar.
5. Lalu mengatur *pulse width* dengan menekan tombol *pw (ms)* pada *parameter selection* sebesar 2 ms
6. Menekan tombol *Run* untuk memulai tes semprotan.
7. Mendokumentasikan hasil semprotan ketika injektor mulai menyemprotkan bahan bakar
8. Menunggu hingga tanda peringatan tes selesai.
9. Mematikan kontrol pemanas hingga pemanas injektor kembali dingin.
10. Mengulangi langkah 5 hingga tekanan injeksi sebesar 6 ms dengan interval 1 ms.
11. Mengulangi langkah penelitian dari langkah 4 hingga tekanan sebesar 5 bar dengan interval 1 bar.

3.3.3.3 Pengujian Karakteristik Semprotan Injektor Bioetanol dengan Pemanas Induksi

1. Memasang injektor pada screen.
2. Menyalakan alat *injektor tester*.
3. Menyalakan pemanas induksi dari injektor.

4. Untuk *item selection*, memilih *Uniformity/Sprayability Test* pada *item selection*.
5. Mengatur putaran sebesar 2000 rpm.
6. Mengatur parameter tekanan injeksi bahan bakar sebesar 3 bar.
7. Mengatur *pulse width* sebesar 2 ms
8. Mengatur temperatur pemanas sebesar 50°C.
9. Menekan tombol *Run* untuk memulai tes semprotan.
10. Mendokumentasikan hasil semprotan ketika injektor mulai menyemprotkan bahan bakar
11. Menunggu hingga tanda peringatan tes selesai.
12. Mematikan kontrol pemanas hingga pemanas injektor kembali dingin.
13. Mengulangi langkah penelitian dari langkah 8 hingga *pulse width* sebesar 6 ms dengan interval 1 ms.
14. Mengulangi langkah 7 hingga tekanan injeksi bahan bakar sebesar 6 bar dengan interval 1 bar.
15. Mengulangi langkah 4 untuk temperatur 60 dan 70°C.

3.4 Rancangan Eksperimen

Dalam perancangan eksperimen ada beberapa parameter yang ingin didapatkan dengan menetapkan parameter input dan output. Tabel rancangan eksperimen dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.2 berikut :

Tabel 3. 2 Rancangan Penelitian

Parameter Input		Parameter Output	
Tetap	Berubah	Diukur	Hasil
Bahan bakar bioetanol E100	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pulse width</i> (ms) : - 3 - 4 - 5 - 6 	<ul style="list-style-type: none"> • Volume (ml) 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Mass flow rate</i> bioetanol - Respon buka tutup injektor - Tekanan injeksi minimal

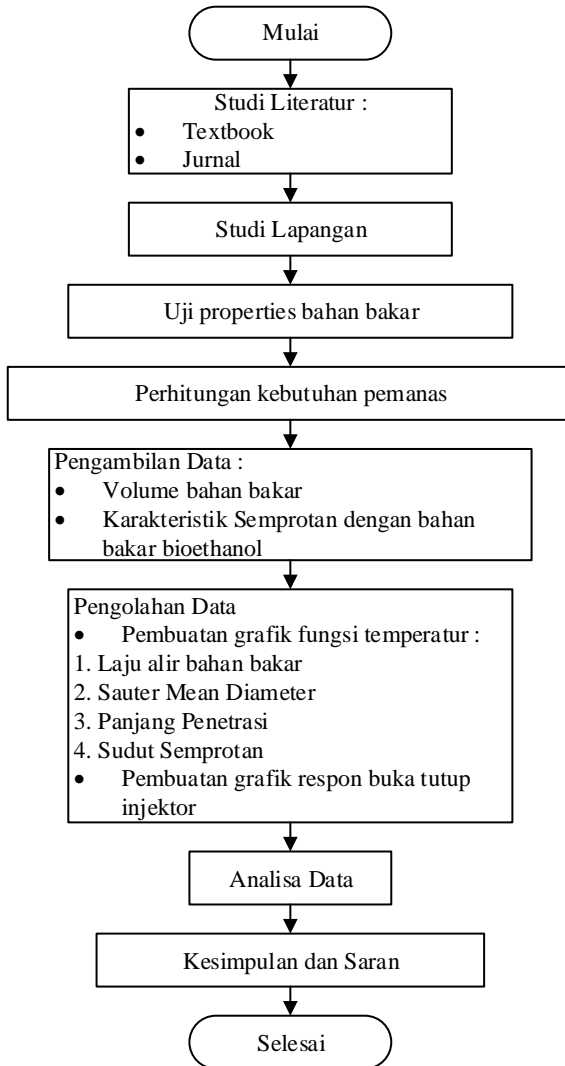
	<ul style="list-style-type: none"> • Tekanan Injeksi (bar) : <ul style="list-style-type: none"> - 3 - 4 - 5 • Temperatur Bioetanol (°C) : <ul style="list-style-type: none"> - 50 - 60 - 70 • Putaran : <ul style="list-style-type: none"> - 2000 - 8000 	<ul style="list-style-type: none"> • Visualisasi Semprotan 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Sauter Mean Diameter</i> (SMD) - Panjang penetrasi - Sudut penetrasi
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Dari eksperimen ini, data-data yang didapatkan, dihitung dan kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik antara lain :

- Grafik variasi temperatur pemanas terhadap karakteristik semprotan berupa densitas, viskositas dan tegangan permukaan
- Grafik variasi temperatur pemanas terhadap karakteristik semprotan berupa *Sauter Mean Diameter*, panjang penetrasi dan sudut semprotan
- Grafik pengaruh temperatur pemanas terhadap laju alir massa bahan bakar
- Grafik pengaruh tekanan injeksi terhadap laju alir massa bahan bakar
- Grafik waktu yang dibutuhkan untuk memanasi bahan bakar dalam keadaan dingin.

3.5 Flowchart Percobaan

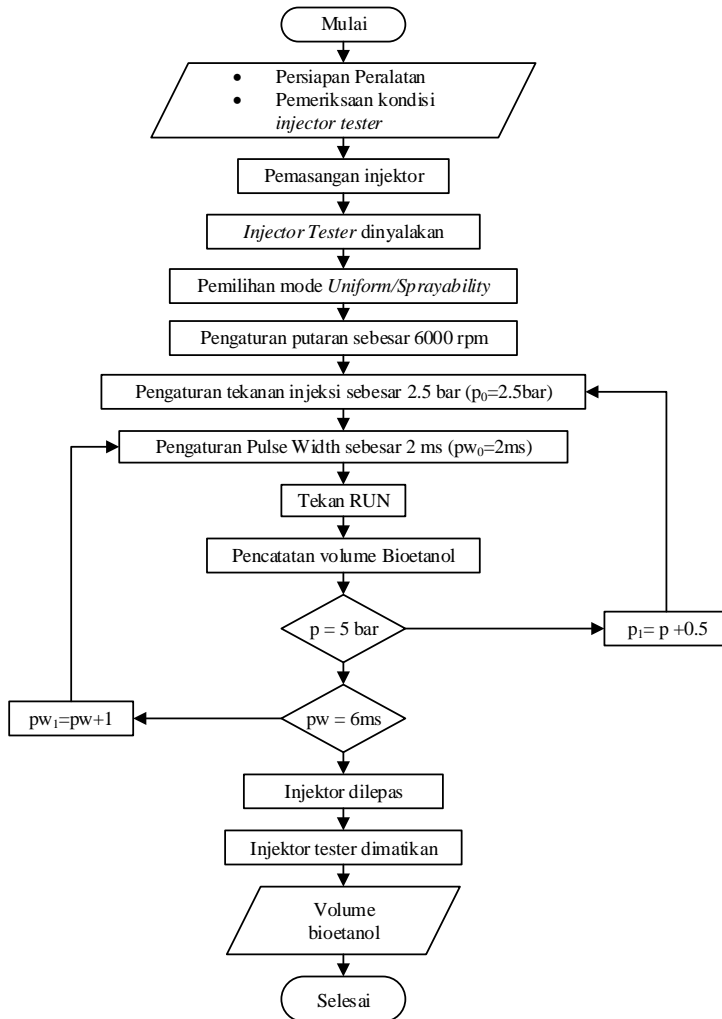
3.5.1 Flowchart Penelitian



Gambar 3. 10 Flowchart Penelitian

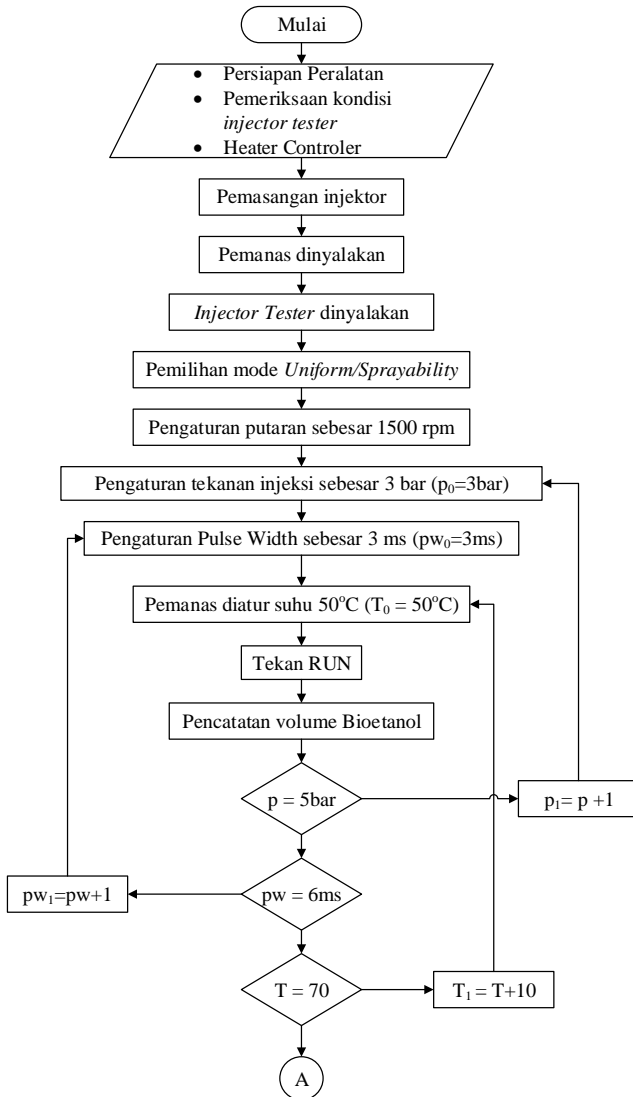
3.5.2 Flowchart Pengujian

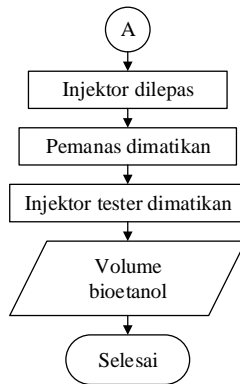
3.5.2.1 Flowchart Pengujian tanpa pemanas bahan bakar bioethanol



Gambar 3. 11 Flowchart pengujian tanpa pemanas

3.5.2.2 Flowchart Pengujian dengan pemanas bahan bakar bioetanol





Gambar 3. 12 Flowchart pengujian dengan pemanas

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai karakterisasi semprotan injektor bioetanol, dan analisa *properties* bioetanol dengan variasi temperatur pemanasan serta perhitungan-perhitungan yang diperlukan dalam penelitian, serta analisa grafik yang diperoleh dari perhitungan. Perhitungan yang dimaksud adalah perhitungan perancangan solenoid dan pemanas yang digunakan, laju alir massa bahan bakar serta diameter droplet rata-rata yang dihasilkan oleh semprotan injektor. Adapun untuk data hasil penelitian seluruhnya bisa dilihat pada lampiran.

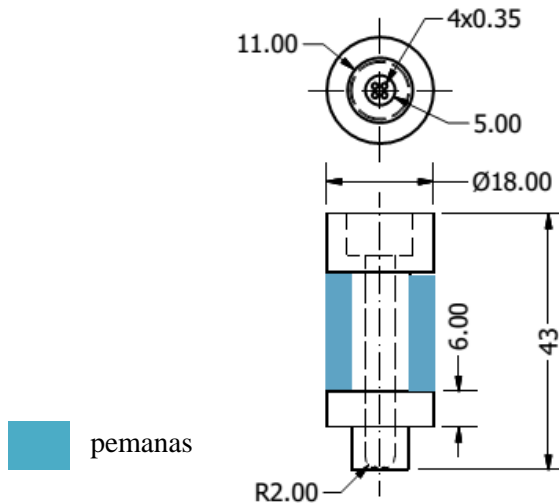
4.1 Perancangan Pemanas

a. Jumlah lilitan pemanas induksi

Bahan pemanas : Kawat nikelin pipih

Lebar : 5 mm

Tebal : 0,5 mm



Gambar 4. 1 Sambungan bawah injektor

$$N_n = \frac{L}{D}$$

$$N_n = \frac{20\text{mm}}{5\text{ mm}}$$

$$N_n = 4 \text{ lilitan}$$

b. Daya yang dibutuhkan pemanas

Daya yang dihitung merupakan kebutuhan daya maksimal untuk memanaskan bioetanol pada temperatur tertinggi yaitu 70°C. Data didapat dari eksperimen yang telah dilakukan.

$$\dot{m} = 0,682 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$c_{\text{bioetanol}} = 2500 \text{ J/kg K}$$

$$T_s = 27^\circ\text{C}$$

Daya yang dibutuhkan pemanas dengan menggunakan perumusan 2.9 :

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{m} \cdot c_{\text{bioetanol}} \cdot \Delta T \\ &= 0,682 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \cdot 2500 \text{ J/kgK} \cdot (70 - 27)^\circ\text{C} \\ &= 73,315 \text{ J/s} = 73,315 \text{ W}\end{aligned}$$

$$\text{Voltase baterai (V)} = 12 \text{ V}$$

Kebutuhan arus untuk pemanas :

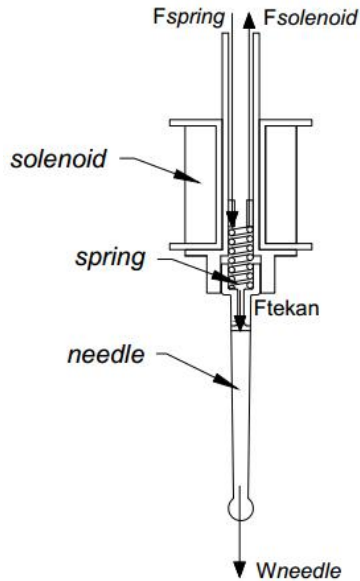
$$P = V \cdot I$$

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{73,315 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 6 \text{ A}$$

Sehingga *accu* ditahan pada arus 6 A

4.2 Perancangan solenoid



Gambar 4. 2 *Free Body Diagram Needle injektor*

a. Menghitung gaya akibat tekanan injeksi

Diketahui :

Tekanan injeksi maksimal (P) = 5 bar = 500.000 N/m^2

Diameter yang dikenai tekanan (d) = 3,5 mm = 0,0035 m

Luasan yang dikenai tekanan (A_{needle}) = $\frac{\pi \cdot d^2}{4} = 9,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

$$\begin{aligned} F_{\text{tekan}} &= P \cdot A_{\text{needle}} \\ &= 500.000 \text{ N/m}^2 \cdot 9,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \\ &= 4,81 \text{ N} \end{aligned}$$

b. Menghitung gaya akibat pegas

Diketahui nilai konstanta pegas deng

$$F_{\text{spring}} = k \cdot \Delta x$$

$$= 202,8708 \text{ N/m}^2 \cdot 0,005 \text{ m}$$

$$= 10,14 \text{ N}$$

c. Menghitung berat *needle*

$$W_{\text{needle}} = m_{\text{needle}} \cdot g$$

$$= 0,0031 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$= 0,030 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 0,030 \text{ N}$$

d. Gaya solenoid total

$$F_{\text{solenoid}} = F_{\text{tekan}} + F_{\text{spring}} + W_{\text{needle}}$$

$$= 4,81 \text{ N} + 10,14 \text{ N} + 0,030 \text{ N}$$

$$= 14,98 \text{ N}$$

e. Jumlah lilitan minimal

$$N = \sqrt{\frac{F_{\text{solenoid}} \cdot 2t^2}{\mu_0 \cdot A_{\text{solenoid}}}}$$

$$N = \sqrt{\frac{14,98 \text{ N} \cdot 2(0,002 \text{ m})^2}{4 \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2 \cdot 0,00048 \text{ m}^2}}$$

$$4,5 \text{ A}$$

$$N = 176 \text{ lilitan}$$

4.3. Analisa properties bahan bakar

Beberapa properties bahan bakar yang diamati antara lain meliputi: densitas, *viscositas* dan tegangan permukaan.

a. Perhitungan Densitas

Densitas (ρ) dihitung dengan rumus :

$$\rho = \frac{m_{\text{bahan bakar}}}{\text{volume bahan bakar}} \left| \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right|$$

Dengan menggunakan data pada temperatur bioetanol 50°C didapat data :

- volume bahan bakar = 40 ml
- massa bahan bakar = 29,8 gram

Sehingga didapat densitas :

$$\rho = \frac{29,8 \text{ gram}}{40 \text{ ml}}$$

$$\rho = 0,7450 \text{ g/ml}$$

$$\rho = 745 \text{ kg/m}^3$$

b. Perhitungan viskositas kinematis

Viskositas kinematis (ν) dihitung dengan rumus :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{cSt}]$$

Dengan menggunakan data pada temperatur bioetanol 50°C, didapat data :

- Viskositas dinamis (μ) = 0,8 cP = $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ N.s/m}^2 = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}$.
- Densitas (ρ) = 745 kg/m^3

Sehingga didapatkan viskositas kinematis :

$$\nu = \frac{0,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}{745 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\nu = 0,1074 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\nu = 1,074 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}} = 1,074 \text{ cSt}$$

c. Perhitungan Tegangan permukaan

Tegangan permukaan (σ) dapat dihitung dengan rumus:

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\ell} = \frac{F_1 - F_0}{\pi \cdot (d_1 + d_2)} \quad \left| \frac{\text{mN}}{\text{m}} \right|$$

Dengan menggunakan data pada temperatur bioetanol 50°C, didapat data :

- Gaya cincin pada titik kritis (F_1) = 50,5 mN
- Gaya cincin saat terendam bioetanol (F_0) = 42 mN
- Diameter dalam cincin (d_1) = 59,13 mm = 0,05913 m
- Diameter luar cincin (d_2) = 57,81 mm = 0,05781 m

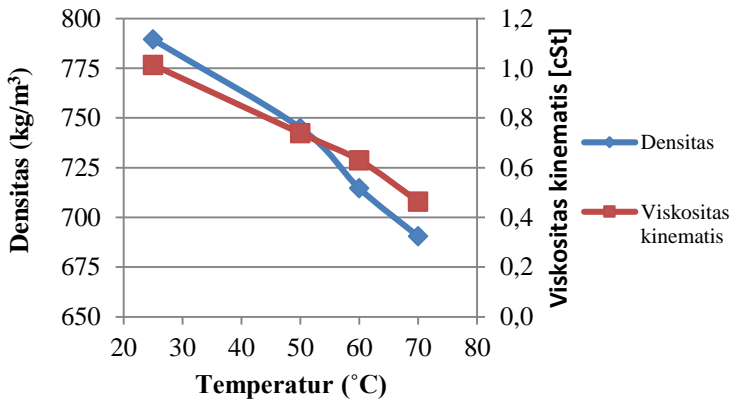
Sehingga didapat tegangan permukaan :

$$\sigma = \frac{50,5 - 42 \text{ mN}}{0,05913 - 0,05781 \text{ m}}$$

$$\sigma = 23,15 \text{ mN/m}$$

4.3.1. Analisa densitas dan viskositas kinematis dengan variasi temperatur

Properti bahan bakar adalah sifat atau karakter yang dimiliki oleh suatu bahan bakar yang terkait dengan kinerja bahan bakar tersebut dalam proses atomisasi dan pembakaran. Viskositas adalah salah satu sifat bahan bakar yang menentukan besarnya perlawanan terhadap gaya geser. Viskositas yang terlalu tinggi menyulitkan dalam pemompaan dan sulit untuk diinjeksi sehingga atomisasi bahan bakar menjadi buruk.



Gambar 4. 3 Grafik variasi temperatur terhadap densitas dan viskositas kinematis

Hasil pegujian densitas dan viskositas bioetanol terlihat pada gambar 4.3 Garis horisontal menunjukkan perubahan temperatur, sedangkan garis vertikal disebelah kiri menunjukkan perubahan densitas dalam satuan kg/m^3 dan garis vertikal sebelah kanan menunjukkan perubahan viskositas cSt.

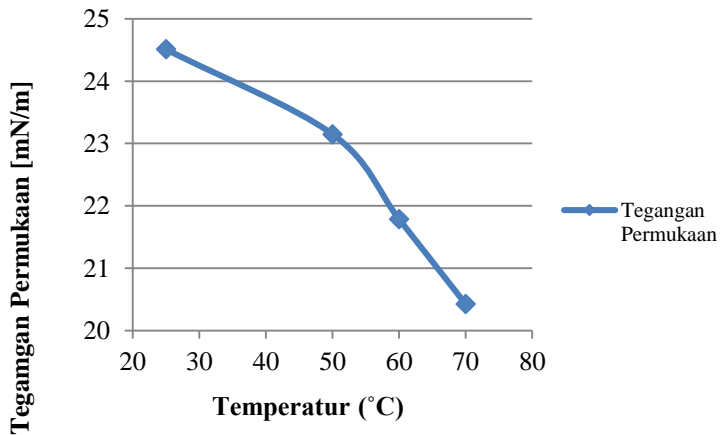
Dari gambar 4.3 dapat disimpulkan bahwa massa jenis bioetanol menurun seiring dengan meningkatnya temperatur bioetanol. Penurunan juga terjadi pada viskositas. Semakin

tingginya temperatur bioetanol menyebabkan penurunan viskositas.

Peristiwa perubahan viskositas dapat dijelaskan dengan teori termodinamika yang menyatakan bahwa semakin tinggi temperatur suatu fluida, molekul fluida akan bergerak cepat sehingga secara makro akan meningkatkan tekanan. Jika tidak terdapat batas pada materi tersebut maka materi akan mengembang dan memperlebar jarak antar molekulnya. Jarak antar molekul yang lebar akan mengakibatkan kerapatan (densitas) dan viskositas semakin menurun.

4.3.2. Analisa tegangan permukaan dengan variasi temperatur

Tegangan Permukaan suatu zat cair didefinisikan sebagai gaya tiap satuan panjang. Jika pada suatu permukaan sepanjang ℓ bekerja gaya sebesar F yang arahnya tegak lurus pada ℓ , dan menyatakan tegangan permukaan. Pada umumnya nilai tegangan permukaan zat cair berkurang dengan adanya kenaikan suhu.



Gambar 4. 4 Grafik variasi temperatur terhadap tegangan permukaan

Pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai tegangan permukaan bioetanol menurun seiring dengan kenaikan temperatur. Menurunnya tegangan permukaan berperan dalam mempercepat butiran-butiran droplet bahan bakar untuk pecah menjadi butiran-butiran lebih kecil (*secondary break-up*) yang selanjutnya akan menyebar ke segala arah. Penyebaran ini menyebabkan permukaan kontak butiran droplet bahan bakar dengan udara lebih besar, sehingga penguapan yang terjadi akan lebih cepat. Nilai tegangan permukaan bioetanol juga dipengaruhi oleh viskositas dan densitas cairan tersebut dimana semakin rendah viskositas dan densitasnya maka nilai tegangan permukaannya juga rendah.

4.4. Pengujian karakteristik semprotan

4.4.1. Laju alir massa bahan bakar

Perhitungan menggunakan perumusan :

$$\dot{m} = \frac{\rho_{\text{bioetanol}} \cdot V_{\text{bioetanol}}}{t_{\text{bioetanol disemprotkan}}}$$

Dengan menggunakan data pada temperatur bioetanol 50°C dengan tekanan injeksi sebesar 3 bar dan *pulse width* sebesar 6 ms :

- Densitas (ρ) = 745 kg/m³
- Volume bioetanol yang disemprotkan (V) = 37,5 ml = 3,75.10⁻⁷m³
- Waktu penyemprotan bioetanol = 52 s

Maka :

$$\dot{m} = \frac{745 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3,75 \cdot 10^{-7} \text{m}^3}{52 \text{ s}}$$

$$\dot{m} = 1,176 \cdot 10^{-9} \text{ kg/s}$$

4.4.2. Perhitungan Sauter Mean Diameter

a. Perhitungan Bilangan Reynolds

Perhitungan menggunakan perumusan :

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\text{bioetanol}} \cdot v \cdot d_{\text{outlet hole}}}{\mu_{\text{bioetanol}}}$$

Dengan menggunakan data pada temperatur bioetanol 50°C dengan tekanan injeksi sebesar 3 bar dan *pulse width* sebesar 6 ms :

- Densitas (ρ) = 745 kg/m³
- Laju alir massa bahan bakar (\dot{m}) = 1,176.10⁻⁹ kg/s
- Viskositas dinamis bahan bakar (μ_f) = 5.10⁻⁴ N.s/m²
- Diameter *outlet hole* injektor = 0,2 mm = 2.10⁻⁴ m

Kecepatan fluida didapat dari perumusan

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho \cdot v \cdot A \\ v &= \frac{\frac{\dot{m}}{4}}{\rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \\ &= \frac{\frac{1,176 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{4}}{745 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi \cdot (2 \cdot 10^{-4} \text{ m})^2}{4}} \\ &= 5,56 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Sehingga bilangan reynolds :

$$\begin{aligned}\text{Re} &= \frac{\rho_{\text{bioetanol}} \cdot v \cdot d_{\text{outlet hole}}}{\mu_{\text{bioetanol}}} \\ &= \frac{745 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5,56 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}} \\ &= 1507\end{aligned}$$

b. Perhitungan Bilangan Weber

Perhitungan menggunakan perumusan :

$$\text{We} = \frac{\rho_{\text{bioetanol}} \cdot v^2 \cdot d_{\text{outlet hole}}}{\sigma_{\text{bioetanol}}}$$

Dengan menggunakan data pada temperatur bioetanol 50°C dengan tekanan injeksi sebesar 3 bar dan *pulse width* sebesar 6 ms :

- Densitas (ρ) = 745 kg/m³
- Laju alir massa bahan bakar (\dot{m}) = 1,176.10⁻⁹ kg/s
- Tegangan Permukaan (σ) = 24,51 dyne/cm = 2,451.10⁻⁴ N/m
- Diameter *outlet hole* injektor = 0,2 mm

Kecepatan fluida didapat dari perumusan

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

dengan $\dot{m} = 1,176 \cdot 10^{-9} \text{ kg/s}$, maka :

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

$$\begin{aligned} v &= \frac{\frac{\dot{m}}{4}}{\rho \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}} \\ &= \frac{\frac{1,176 \cdot 10^{-9} \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{4}}{745 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi \cdot (2 \cdot 10^{-4} \text{ m})^2}{4}} \\ &= 5,56 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sehingga bilangan weber :

$$\begin{aligned} We &= \frac{\rho_{\text{bioetanol}} \cdot v^2 \cdot d_{\text{outlet hole}}}{\sigma_{\text{bioetanol}}} \\ &= \frac{745 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (5,56 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}}{2,451 \cdot 10^{-4} \frac{\text{N}}{\text{m}}} \\ &= 199,3 \end{aligned}$$

d. Perhitungan *Sauter Mean Diameter*

Perhitungan *Sauter Mean Diameter* menggunakan perumusan :

$$\text{SMD} = 4,12d \cdot \text{Re}^{0,12} \text{We}^{-0,75} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0,54} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0,18}$$

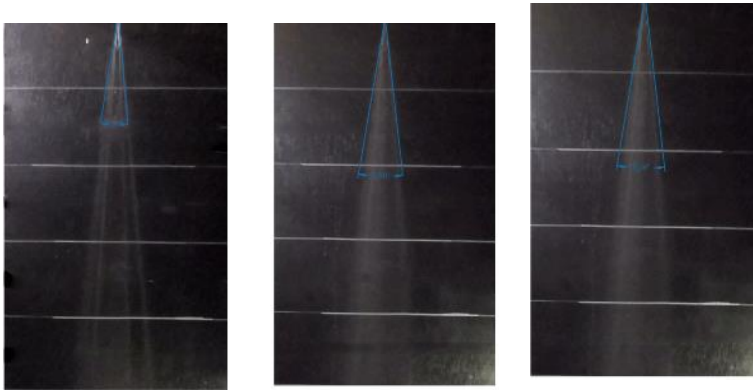
Dengan menggunakan data pada temperatur bioetanol 50°C dan tekanan injeksi sebesar 3 bar dan *pulse width* sebesar 6 ms :

- Diameter *outlet hole* injektor = 0,2 mm
- Bilangan Reynolds (Re) = 1507
- Bilangan Weber (We) = 199,3
- Viskositas dinamis bahan bakar (μ_f) = $5 \cdot 10^{-4} \text{ N.s/m}^2$
- Viskositas dinamis udara (μ_g) = $1,84 \cdot 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$
- Densitas bahan bakar (ρ_f) = 745 kg/m^3
- Densitas udara (ρ_g) = $1,19 \text{ kg/m}^3$

$$\begin{aligned}
 \text{SMD} &= 4,12d \cdot \text{Re}^{0,12} \text{We}^{-0,75} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0,54} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0,18} \\
 &= 4,12 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{m} \cdot 1507^{0,12} 199,3^{-0,75} \left(\frac{5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}}{1,84 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} \right)^{0,54} \left(\frac{745 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{0,18} \\
 \text{SMD} &= 7,46 \cdot 10^{-4} \text{m} = 746 \mu\text{m}
 \end{aligned}$$

4.4.3. Hasil visualisasi semprotan

Uji karakteristik semprotan dilakukan secara visual dengan menggunakan *slow-motion* kamera. Hasil visualisasi semprotan ditunjukkan pada gambar 4.6 hingga 4.9. Gambar tersebut menyatakan visualisasi semprotan bahan bakar untuk temperatur bahan bakar 27°C, 50°C, 60°C dan 70°C dengan kondisi udara ambient (1 atm).

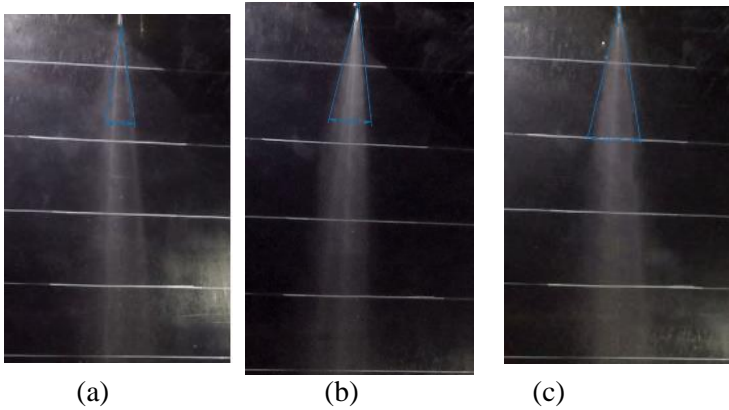


(a)

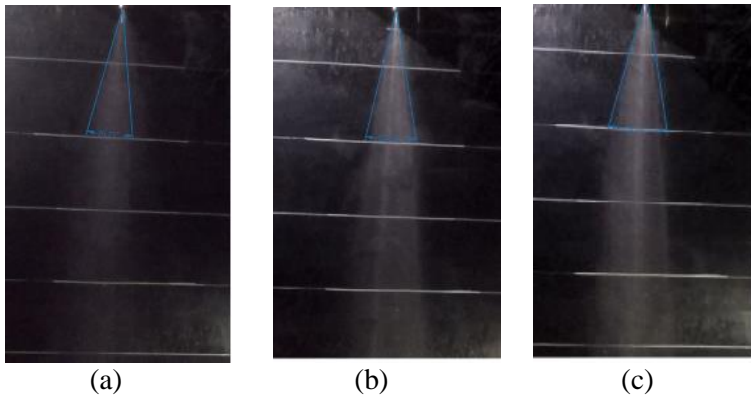
(b)

(c)

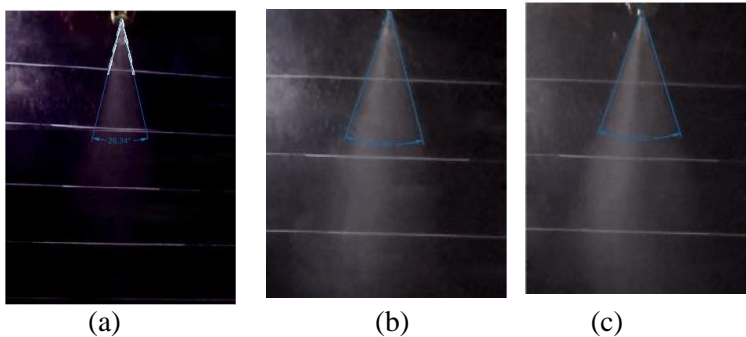
Gambar 4. 5 Visualisasi Semprotan tanpa pemanas pada tekanan
(a) 3 bar, (b) 4 bar dan (c) 5 bar



Gambar 4. 6 Visualisasi Semprotan temperatur 50°C pada tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar dan (c) 5 bar



Gambar 4. 7 Visualisasi Semprotan temperatur 60°C pada tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar dan (c) 5 bar

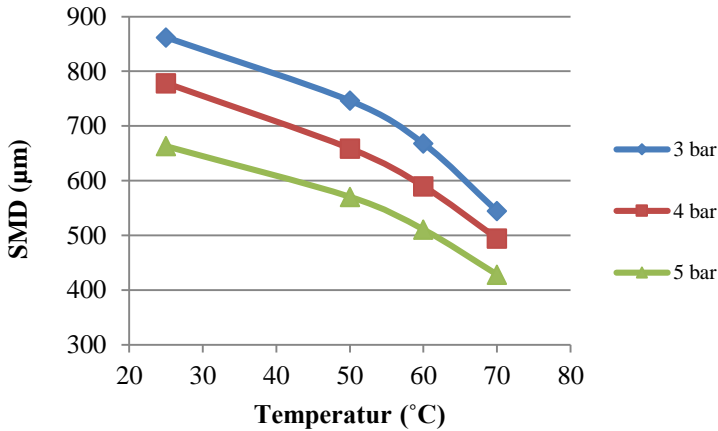


Gambar 4. 8 Visualisasi Semprotan temperatur 70°C pada tekanan (a) 3 bar, (b) 4 bar dan (c) 5 bar

Dari hasil visualisasi tersebut terlihat bahwa semakin tingginya tekanan terlihat semprotan semakin mengkabut. Begitu pula dengan semakin naiknya temperatur, semprotan juga semakin mengkabut. Semakin mengkabutnya semprotan bahan bakar, maka semakin mudah bahan bakar menyatu dengan udara.

4.4.4. Analisa Sauter Mean Diameter

Sauter Mean Diameter merupakan pendekatan untuk mengetahui diameter droplet rata-rata bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar. Semakin kecil ukuran droplet maka semakin mudah bahan bakar bercampur dengan udara. Hal ini penting untuk diketahui mengingat bioetanol memiliki nilai kalor laten yang tinggi sehingga membutuhkan energi lebih untuk evaporasi. Salah satu cara untuk mengatasi sulitnya penyalaan awal pada engine yaitu dengan pemberian energi berupa panas pada bahan bakar agar bahan bakar tersebut mudah berevaporasi. Sehingga engine mudah untuk dinyalakan pada keadaan dingin.



Gambar 4. 9 Grafik pengaruh temperatur terhadap Sauter Mean Diameter

Grafik 4.9 merupakan grafik pengaruh temperatur bahan bakar terhadap *Sauter Mean Diameter*. Diameter droplet rata-rata terbesar pada kondisi standar dimana bahan bakar tidak dipanaskan. Hal ini berlaku untuk variasi tekanan yang digunakan. Semakin tinggi tekanan injeksi maka diameter droplet rata-rata bahan bakar mengalami penurunan. Sedangkan diameter droplet rata-rata terkecil pada temperatur bahan bakar 70°C dengan tekanan injeksi 5 bar. Semakin naiknya temperatur maka diameter droplet rata-rata semakin turun. Hal ini berlaku untuk semua tekanan injeksi.

Pada Grafik 4.10 dapat dilihat bahwa semakin naiknya temperatur maka akan menyebabkan diameter droplet rata-rata injeksi semakin kecil. Hal ini sesuai dengan perumusan :

$$SMD = 4,12d \cdot Re^{0,12} We^{-0,75} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0,54} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0,18}$$

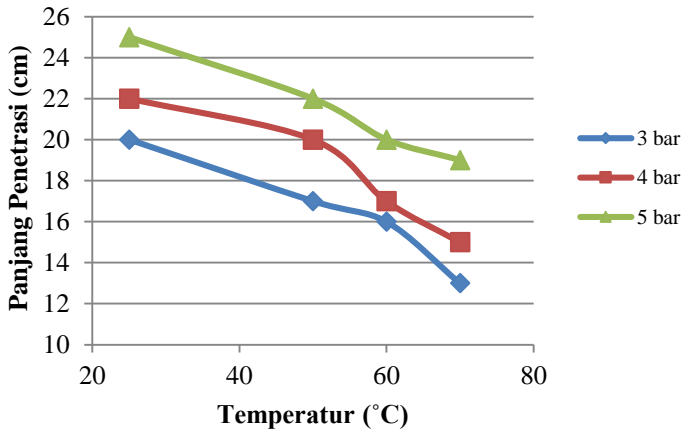
$$Re = \frac{\rho_{bioetanol} \cdot v \cdot d_{outlet \ hole}}{\mu_{bioetanol}}$$

$$We = \frac{\rho_{\text{bioetanol}} \cdot v^2 \cdot d_{\text{outlet hole}}}{\sigma_{\text{bioetanol}}}$$

Nilai dari densitas, viskositas dan tegangan permukaan bahan bakar menurun seiring dengan naiknya temperatur. Hal ini mengakibatkan semakin turunnya nilai Sauter Mean Diameter dengan naiknya temperatur bahan bakar. Dengan adanya pemanas tambahan pada badan injektor memberi energi berupa panas ke bahan bakar. Hal ini untuk menanggulangi permasalahan tingginya kalor panas laten yang dimiliki bahan bakar bioetanol sehingga menyulitkan penyalaan awal terutama ketika penyalaan dingin. Ukuran droplet rata-rata bahan bakar yang semakin kecil karena adanya pemanas akan memudahkan bahan bakar tersebut menyatu dengan udara. Sehingga akan mengakibatkan homogenitas campuran bahan bakar dengan udara. Hal ini akan memudahkan engine untuk dinyalakan dalam keadaan dingin dengan bahan bakar bioetanol.

4.4.5. Analisa Panjang Penetrasi

Panjang penetrasi merupakan jarak terjauh yang ditempuh bahan bakar dari ujung keluaran injektor. Semakin tinggi tekanan injeksi jarak terjauh yang dapat ditempuh oleh bahan bakar semakin panjang.



Gambar 4. 10 grafik pengaruh temperatur terhadap panjang penetrasi

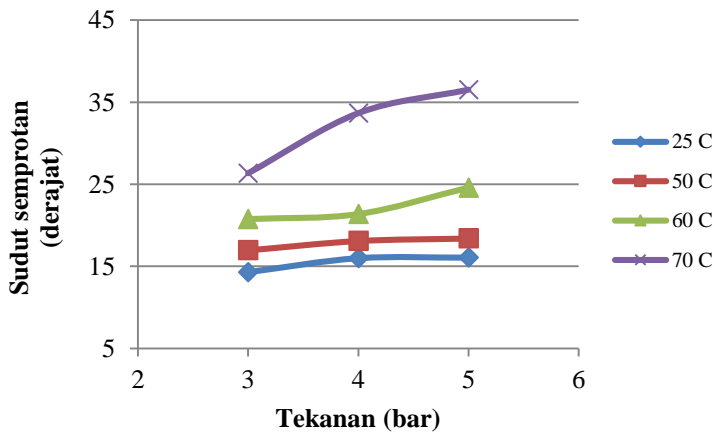
Grafik 4.10 diatas menunjukkan pengaruh temperatur bahan bakar terhadap panjang penetrasi yang dihasilkan oleh semprotan injeksi. Panjang penetrasi terpendek didapat pada temperatur 70°C dengsan tekanan injeksi sebesar 3 bar. Sedangkan panjang peneterasi tertinggi pada bahan bakar kondisi standar tanpa dikenai pemanas dengan tekanan injeksi sebesar 5 bar. Semakin naiknya tekanan injeksi, panjang penetrasi yang dihasilkan akan semakin panjang. Berkebalikan dengan variasi temperatur, dimana semakin tinggi temperatur bahan bakar, panjang penetrasi yang dihasilkan semakin pendek.

Semakin naiknya tekanan injeksi, panjang penetrasi semakin panjang bahan bakar yang diinjeksikan pada tekanan lebih tinggi memiliki kecepatan yang tinggi pula. Dalam waktu yang sama bahan bakar tersebut dapat mencapai jarak lebih jauh dari ujung bawah injektor dibandingkan dengan bahan bakar yang diinjeksikan pada tekanan yang lebih rendah. Sedangkan semakin naiknya temperatur bahan bakar panjang penetrasi akan semakin turun. Hal ini dikarenakan semakin naiknya temperatur diameter

rata-rata droplet semakin kecil sehingga pada jarak terjauh dari ujung injektor droplet sudah menyatu dengan udara, sehingga panjang penetrasi lebih pendek dibandingkan dengan panjang penetrasi semprotan dengan bahan bakar pada kondisi standar (tanpa dipanasi). Selain itu, viskositas yang lebih rendah menyebabkan momentum aliran lebih kecil sehingga penetrasi semprotan menjadi lebih pendek.

4.4.6. Analisa Sudut Semprotan

Sudut semprotan merupakan sudut yang dibentuk oleh dua garis terluar semprotan, dari ujung injektor hingga jarak tertentu. Sudut semprotan menentukan distribusi bahan bakar pada ruang bakar. Semakin lebar sudut yang dihasilkan maka penyebaran bahan bakar semakin luas dibandingkan dengan sudut semprotan yang lebih tajam.



Gambar 4. 11 Grafik pengaruh tekanan terhadap sudut semprotan

Grafik diatas menunjukkan pengaruh tekanan injeksi terhadap sudut semprotan yang dihasilkan. Semakin naiknya

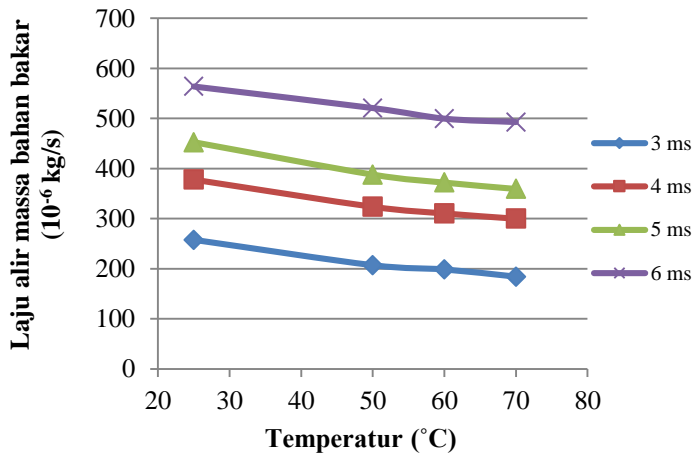
tekanan injeksi bahan bakar maka sudut semprotan yang dihasilkan menjadi lebih lebar. Sudut semprotan tertajam dihasilkan pada kondisi standar dengan tekanan injeksi sebesar 3 bar. Sedangkan sudut semprotan terlebar dihasilkan pada bahan bakar dengan temperatur 70°C pada tekanan injeksi 5 bar.

Semakin tingginya temperatur bahan bakar maka sudut semprotan yang dihasilkan semakin lebar. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi temperatur bahan bakar maka nilai tegangan permukaan yang dimiliki bahan bakar tersebut semakin rendah. Semakin rendahnya nilai tegangan permukaan akan mempercepat butiran-butiran droplet bahan bakar untuk pecah menjadi butiran-butiran lebih kecil (*secondary break-up*) yang selanjutnya akan menyebar ke segala arah. Sedangkan semakin tingginya tekanan injeksi juga mengakibatkan semakin lebar sudut semprotan. Semakin tingginya tekanan maka laju alir massa bahan bakar yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini mengakibatkan penurunan ukuran rata-rata droplet dan semakin memudahkan bahan bakar tersebut untuk menyatu dengan udara. Sehingga akan menyebabkan semakin luasnya penyebaran bahan bakar dalam ruang bakar dan memperbesar sudut semprotan.

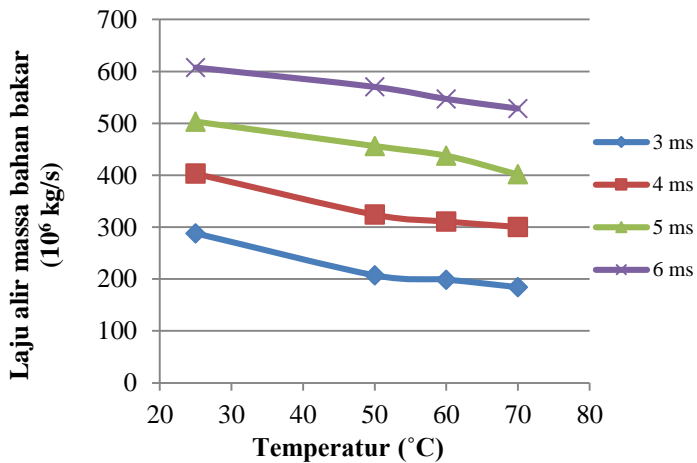
4.5. Analisa laju alir massa bahan bakar

4.5.1. Pengaruh temperatur bioetanol terhadap laju alir massa bahan bakar

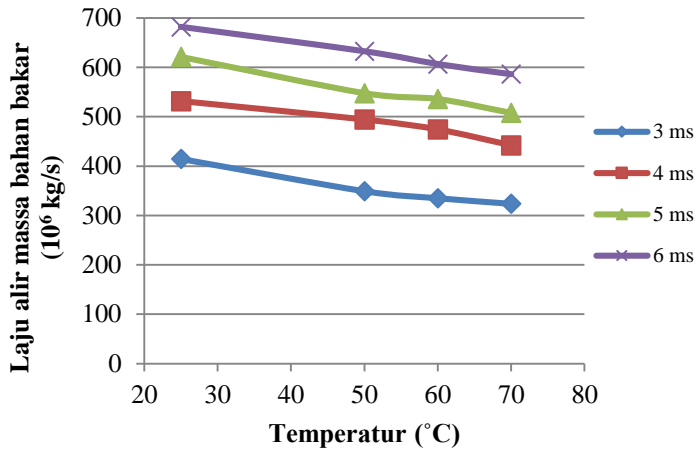
Laju alir massa bahan bakar merupakan banyaknya bahan bakar yang masuk ke ruang bakar dalam waktu tertentu. Besarnya laju alir massa bahan bakar bergantung pada densitas bahan bakar yang digunakan. Pada engine, banyak sedikitnya bahan bakar yang masuk ke ruang bakar mempengaruhi AFR (*Air-fuel Ratio*). Laju alir massa bahan bakar juga menentukan nilai ukuran droplet rata-rata bahan bakar yang disemprotkan oleh injektor.



Gambar 4. 12 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 3 bar



Gambar 4. 13 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 4 bar



Gambar 4. 14 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 5 bar

Pada gambar 4.12 – 4.14 terlihat grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 3, 4 dan 5 bar. Berdasarkan grafik terbut nilai laju alir massa bahan bakar turun seiring dengan naiknya temperatur bioetanol. Hal ini berlaku untuk laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 3 bar pada *pulse width* 3, 4, 5 dan 6 ms, serta tekanan injeksi 4 dan 5 bar untuk *pulse width* 3 dan 4 ms. Laju alir massa bahan bakar pada tekanan 4 dan 5 bar dengan *pulse width* sebesar 5 dan 6 ms dengan variasi temperatur bernilai sama dengan laju alir massa bahan bakar pada bioetanol dengan tidak diberi pemanas (kondisi standar). Dari grafik juga dapat dilihat dengan skala yang sama, semakin naiknya tekanan laju alir massa bahan bakar juga bertambah.

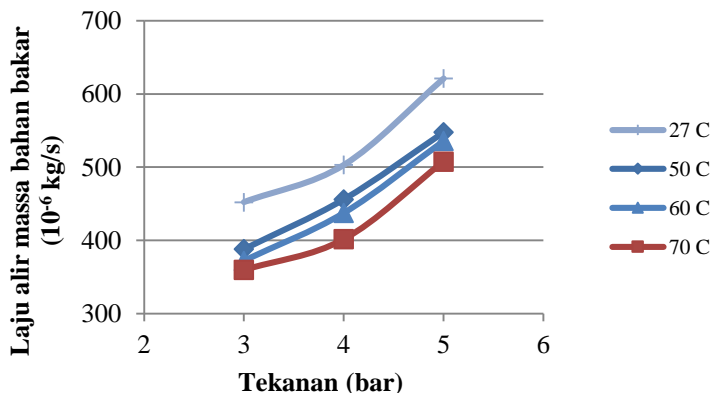
Semakin tingginya temperatur bahan bakar mengakibatkan laju alir massa bahan bakar semakin turun. Hal ini disebabkan karena densitas bioetanol yang semakin menurun dengan peningkatan temperatur. Pernyataan ini sesuai dengan perumusan laju alir massa bahan bakar :

$$\dot{m} = \frac{\rho_{\text{bioetanol}} \cdot V_{\text{bioetanol}}}{t_{\text{bioetanol disemprotkan}}}$$

Ketika temperatur bioetanol tinggi, bioetanol akan menyerap panas yang akan mengubah nilai densitas dari bahan bakar yang menyebabkan laju alir massa bahan bakar menurun. *Pulse width* merupakan lamanya *needle* injektor terbuka. Sehingga semakin besar *pulse width* yang digunakan maka semakin lama *needle* injektor terbuka yang kemudian akan menghasilkan semprotan bahan bakar yang lebih banyak dibanding dengan *pulse width* rendah.

4.5.2. Pengaruh tekanan injeksi terhadap laju alir massa bahan bakar

Pada gambar 4.15 terlihat pengaruh tekanan injeksi terhadap laju alir bahan bakar pada temperatur 50, 60 dan 70°C. Pada Gambar 4.15 terlihat bahwa laju alir bahan bakar naik seiring dengan naiknya tekanan. Jika dibandingkan dengan kondisi standar (tanpa diberi pemanas), laju alir bahan bakar pada temperatur 50°C lebih rendah di bandingkan laju alir bahan bakar tanpa diberi pemanas.



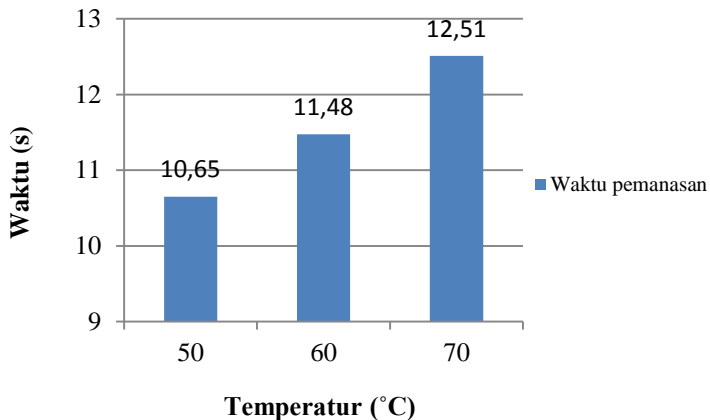
Gambar 4. 15 Grafik pengaruh tekanan terhadap laju alir massa bahan bakar pada variasi temperatur

Pada tekanan 3 bar diperoleh laju alir massa terndah untuk semua variasi temperatur. Sedangkan pada tekanan 5 bar diperoleh variasi tertinggi untuk semua variasi temperatur. Penurunan laju alir massa bahan bakar dari kondisi standar (tanpa dipanaskan) terhadap 50 C untuk semua tekanan rata-rata sebesar 14%, sedangkan penurunan terhadap temperatur 60 C sebesar 17 % dan 20% untuk temperatur 70 C

Laju alir bahan bakar yang naik seiring dengan naiknya tekanan disebabkan oleh kenaikan tekanan yang diiringi oleh kenaikan kecepatan. Semakin tinggi tekanan maka kecepatan fluida yang didapat juga semakin besar. Kecepatan fluida yang semakin besar mengakibatkan semakin banyaknya bahan bakar yang diinjeksikan. Jika dibandingkan dengan laju alir massa bahan bakar tanpa diberi pemanas, laju alir massa bahan bakar dengan diberi pemanas lebih rendah karena adanya penurunan densitas akibat naiknya temperatur. Hal ini ni disebabkan karena semakin tinggi temperatur bahan bakar akan menyebabkan densitas bahan bakar tersebut semakin turun karena molekulnya yang semakin renggang. Semakin tingginya *pulse width* juga menyebabkan laju alir massa bahan bakar semakin naik. Hal ini dikarenakan *pulse width* merupakan lamanya bahan bakar tersebut menginjeksi. Sehingga semakin lama bahan bakar tersebut diinjeksikan semakin banyak volume yang diinjeksikan yang kemudian akan berpengaruh pada laju alir massa bahan bakar yang semakin naik.

4.6 Analisa waktu pemanasan

Penelitian menggunakan bahan bakar bioetanol dengan temperatur bahan bakar sebesar 50, 60 dan 70 C pada putaran 2000 rpm. Pemanas yang digunakan dinyalakan saat injektor dalam keadaan dingin guna memudahkan penyalan awal pada mesin sinjai-150.



Gambar 4. 16 Grafik waktu pemanasan saat keadaan dingin

Gambar 4.16 menunjukkan variasi temperatur bioetanol pada keluaran injektor terhadap waktu pemanasan saat penyalaan awal pada kondisi dingin. Pada temperatur bioetanol sebesar 50° C dibutuhkan waktu pemanasan 10,65 detik. Pada temperatur bioetanol masukan injektor sebesar 60° C, waktu pemanasan mengalami kenaikan, yaitu pada 11,48 detik. Sedangkan pada temperatur bioetanol sebesar 70° C, waktu pemanasan semakin naik sampai 12,51 detik. Pada pemanasan tersebut, daya pemanas sebesar 73,315 watt dan menggunakan kawat nikelin berdiameter 1,2 mm

Dengan input daya yang sama semakin tinggi temperatur maka waktu yang dibutuhkan untuk memanaskan bahan bakar semakin lama, begitu pula sebaliknya. Hal ini dikarenakan listrik memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai panas lebih tinggi.

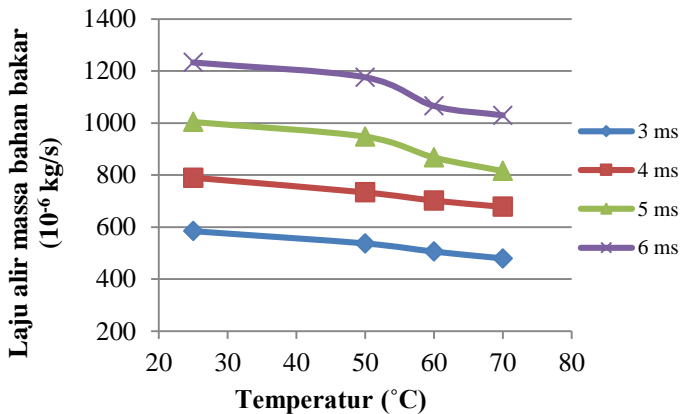
4.7. Analisa respon *needle* injektor

Analisa respon ketepatan buka dan tutup *needle* injektor penting untuk mengetahui kepekaan solenoid injektor. Ketika

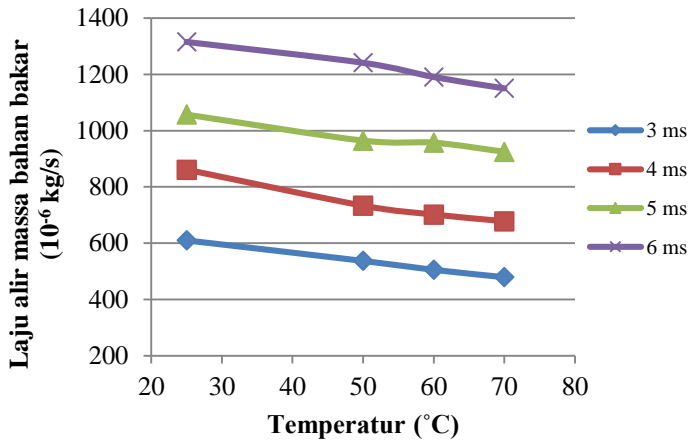
injector tester di “run”, ada jeda waktu selama 1,549 detik untuk injektor menyembrotkan bahan bakar. Sedangkan ketika injector tester di “stop”, terdapat jeda waktu selama 3,872 detik, hingga bahan bakar benar-benar berhenti keluar dari injektor. Hal yang mempengaruhi ketepatan buka tutup injektor yaitu viskositas bahan bakar. Semakin kecil viskositas bahan bakar maka *needle* cenderung lebih cepat kembali ke posisi semula. Sedangkan untuk mengangkat *needle* dipengaruhi oleh kekuatan magnet dari solenoid.

4.8 Analisa Laju alir massa bahan bakar pada putaran 8000rpm

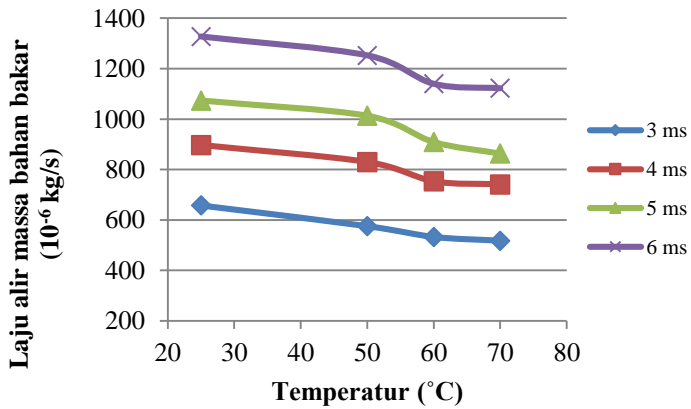
Analisa laju alir massa bahan bakar pada putaran 8000rpm penting dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh pemanas pada putaran 8000rpm.



Gambar 4. 17 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 3 bar



Gambar 4. 18 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 4 bar



Gambar 4. 19 Grafik pengaruh temperatur terhadap laju alir massa bahan bakar pada tekanan injeksi 5 bar

Laju alir massa massa bahan bakar pada putaran 8000 rpm terlihat lebih tinggi daripada 2000rpm. Hal ini dikarenakan putaran engine yang lebih banyak menyebabkan bahan bakar yang disemprotkan juga lebih banyak. Dari grafik tersebut dapat dilihat penurunan laju alir massa bahan bakar seiring dengan naiknya temperatur. Hal ini mengindikasikan bahwa pada putaran tinggi pemanas masih dapat memanasi bahan bakar walaupun bahan bakar memiliki kecepatan yang lebih cepat dibandingkan dengan pada putaran rendah.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun penelitian yang didapat dari penelitian :

1. Jeda waktu dari pompa bahan bakar hingga bahan bakar menyembrot adalah 1,54 detik, sedangkan waktu *needle* menutup tanpa adanya bahan bakar sisa yang keluar adalah 3,87 detik.
2. Hasil karakteristik semprotan :
 - a. Pada variasi temperatur, nilai *Sauter Mean Diameter* menurun seiring dengan peningkatan temperatur bahan bakar. Nilai terkecil sebesar 428 μ m didapat pada variasi temperatur tertinggi, yaitu 70°C dan terbesar didapat pada kondisi standar. Sedangkan pada variasi tekanan, nilai *Sauter Mean Diameter* juga menurun seiring peningkatan tekanan. Nilai terkecil sebesar 861 μ m didapat pada variasi tekanan 5 bar dan terbesar didapat pada tekanan 3 bar.
 - b. Pada variasi temperatur, panjang penetrasi semprotan menurun seiring dengan peningkatan temperatur bahan bakar. Sedangkan pada variasi tekanan, panjang penetrasi meningkat seiring dengan peningkatan tekanan injeksi. Nilai panjang penetrasi terendah sebesar 13cm didapat pada tekanan 3 bar dengan temperatur bahan bakar sebesar 70°C. Sedangkan panjang penetrasi terpanjang sebesar 25 cm didapat pada tekanan 5 bar dengan temperatur bahan bakar sebesar 25°C.
 - c. Nilai sudut semprotan meningkat seiring dengan peningkatan tekanan injeksi dan temperatur bahan bakar. Nilai sudut semprotan terbesar sebesar 36,5° didapat pada temperatur bahan bakar sebesar 70°C dengan tekanan injeksi sebesar 5 bar. Sedangkan nilai

terkecil sebesar $14,2^\circ$ didapat pada temperatur bahan bakar standar (25°C) dengan tekanan injeksi 3 bar.

3. Laju alir massa semakin menurun seiring dengan peningkatan temperatur bahan bakar dan meningkat seiring dengan meningkatnya *pulse width* dan tekanan injeksi. Hal ini berlaku untuk putaran *engine* terendah yaitu 2000 rpm dan putaran maksimal *engine* yaitu 8000rpm.

5.2 Saran

1. Pemberian isolasi pada pemanas agar bahan bakar lebih cepat mencapai temperatur yang diinginkan.
2. Temperatur bahan bakar dinaikkan lagi untuk melihat pengaruh pada karakteristik semprotan.
3. Pengamatan sudut semprotan juga diamati kesimetrisan sudut semprotan yang dihasilkan oleh injektor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jeuland,N., Montagne, X., dan Gautrot, X. 2004. “Potentiality of Ethanol as a fuwl dor dedicated engine”. **Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP**. Vol 59 (2004), No. 6, pp. 559-570.
- [2] Pamuji, Gayuh Agung dan Sudarmanta, Bambang. 2017. “Studi eksperimen pengaruh *Mapping Ignition Timing* dan durasi penginjeksian bahan bakar terhadap unjuk kerja dan emisi gas buang *engine* Honda CBR 150R berbahan bakar bioetanol E100”. **Jurnal Teknik ITS**.
- [3] Rezende, A dan Moreira, Jose Roberto. 2011. “Thermal modeling of a novel heated tip injector for otto cycle engine powered by ethanol”. **Energy and Power Engineering**, 2012, 4 , 85-91.
- [4] Prayoga, Nickyn dan Sudarmanta, Bambang. 2017. “Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Temperatur Bahan Bakar Terhadap Penyalaan Awal dan Unjuk Kerja serta Emisi Motor Honda Cb150r Berbahan Bakar Bioetanol E100”. **Jurnal Teknik ITS Vol. 4**, No. 1, (2015), ISSN: 2337-3539.
- [5] Ommi, F., Movahednejad, E., dan Nekofar, K. 2008. “Study of injection parameters on performance and fuel consumption in a port-injected gasoline engone with experiment with experimental and theoritical methods”. **Tome VI (2008)**, Fascicule 2, (ISSN 1584-2665)
- [6] Kawano, D. S. 2014. “**Motor bakar torak : Bensin**”. Surabaya : ITS Press.
- [7] Stone, Richard. 1985. “**Introduction to Internal Combustion Engine**”. Jerman : McMillan.
- [8] Martinez, Simon., Cruz, Fausto., Bermudez, Vicente dan Avila, Jose. 2010. **Fuel Injection**. Croatia : InTech.
- [9] Lefebvre, Arthur dan McDonell, Vincent. 2017. “**Atomization and Sprays**”. New York : CRC Press.

- [10] Ren, Min W dan Sayar, H. 2001. "Influence of Nozzle Geometry on Spray Atomization and Shape for Port Fuel Injector". **SAE Technical Paper**, No.01-0608.
- [11] Pritchard, Philip J. 2011. "**Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics 8th Edition**". USA : John Wiley & Sons, Inc.
- [12] Bartok, William dan Sarodim, Adel F. 1991. "**Fossil Fuel Combustion: A source book**". Kanada : John Wiley & Sons, Inc.
- [13] Payri, Raul., Gracia, Antonio, Domenech, Vicent dan Durret, Russell. 2011. "An experiment study of gasoline effects on injection rate, momentum flux and spray characteristics using a common rail diesel injection system". **Elsevier Fuel 97 (2012)**. 390-399.
- [14] Demirbas, Ayhan. 2009. "**Green Energy and Technology : Biofuels**". Jerman : Springer.
- [15] Park, Su Han., Kim, Hyung Jun., Suh, Hyun Kyu dan Lee, Chang Sik. 2009. "Atomization and spray characteristics of bioethanol and bioethanol blended gasoline fuel injected through a direct injection gasoline injector". **Elsevier International Journal of Heat and Fluid Flow 30**. 1183-1192.
- [16] Yoon, Seung Hoon dan Chang Sik, Lee. 2012. "Effect of undiluted bioethanol on combustion and emissions reduction in a SI engine at various charge air conditions". **Elsevier Fuel 97 (2012)**. 887-890.
- [17] Incropera, Frank P., Bergman, Theodore L., Lavine, Adrienne S dan Dewitt, David P. 2011. "**Fundamental of Heat and Mass Transfer 7th Edition**". USA : John Wiley & Sons, Inc.
- [18] Chuepeng, Sataporn. 2016. "Effects of heated ethanol on retrofit single-hole gasoline injector performance". **Elsevier Case Studies in thermal engineering 8 (2016)**. 245-249.

- [19] Halliday, David., Resnick, Robert dan Walker, Jearl. 2011.
“**Fundamentals of Physics**”. Kanada : John Wiley &
Sons, Inc.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Lampiran 1

Data Pengujian

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

T (C)	P [bar]	diameter nozzle (mm)	Luas (m2)	Kecepatan (m/s)	Re	We	$\mu\text{f}/\mu\text{g}$	$\rho\text{f}/\rho\text{g}$	SMD (μm)	Sudut semprotan	Panjang Penetrasi (mm)
25	3	0,2	3,14E-08	5,6869882	1122,431876	208,3447358	43,47826	663,423	861,88	14,28	20
	4	0,2	3,14E-08	6,1244488	1208,772789	241,6305812	43,47826	663,423	778,10	15,99	22
	5	0,2	3,14E-08	6,8760857	1357,122177	304,5793415	43,47826	663,423	663,22	16,06	25
50	3	0,2	3,14E-08	5,5651241	1507,642721	199,3470408	29,89130	626,050	746,10	16,96	17
	4	0,2	3,14E-08	6,0907643	1650,043428	238,7831471	29,89130	626,050	658,73	18,10	20
	5	0,2	3,14E-08	6,7600048	1831,346757	294,1400012	29,89130	626,050	570,46	18,41	22
60	3	0,2	3,14E-08	5,5651241	1767,567884	203,1731073	24,45652	600,533	667,70	20,77	16
	4	0,2	3,14E-08	6,0907643	1934,519186	243,3661106	24,45652	600,533	589,51	21,38	17
	5	0,2	3,14E-08	6,7600048	2147,080118	299,7854284	24,45652	600,533	510,52	24,58	20
70	3	0,2	3,14E-08	5,6810642	2451,64974	218,2074507	17,39130	580,232	544,17	26,34	13
	4	0,2	3,14E-08	6,0907643	2628,454845	250,8151518	17,39130	580,232	494,31	33,66	15
	5	0,2	3,14E-08	6,7600048	2917,263979	308,9613733	17,39130	580,232	428,08	36,52	19

Laju alir massa bahan bakar 8000rpm
Standar

Tekanan [bar]	Pulse width [ms]	waktu penyemprotan [s]	Volume [ml]	Volume 10 ⁶ [m ³]	Laju alir massa bb 10 ⁶ [kg/s]
3	3	54	40	40,0	585
	4	53	53	53,0	789
	5	57	72,5	72,5	1004
	6	56	87,5	87,5	1234
4	3	55	42,5	42,5	610
	4	55	60	60,0	861
	5	56	75	75,0	1057
	6	57	95	95,0	1316
5	3	54	45	45,0	658
	4	55	62,5	62,5	897
	5	57	77,5	77,5	1073
	6	58	97,5	97,5	1327

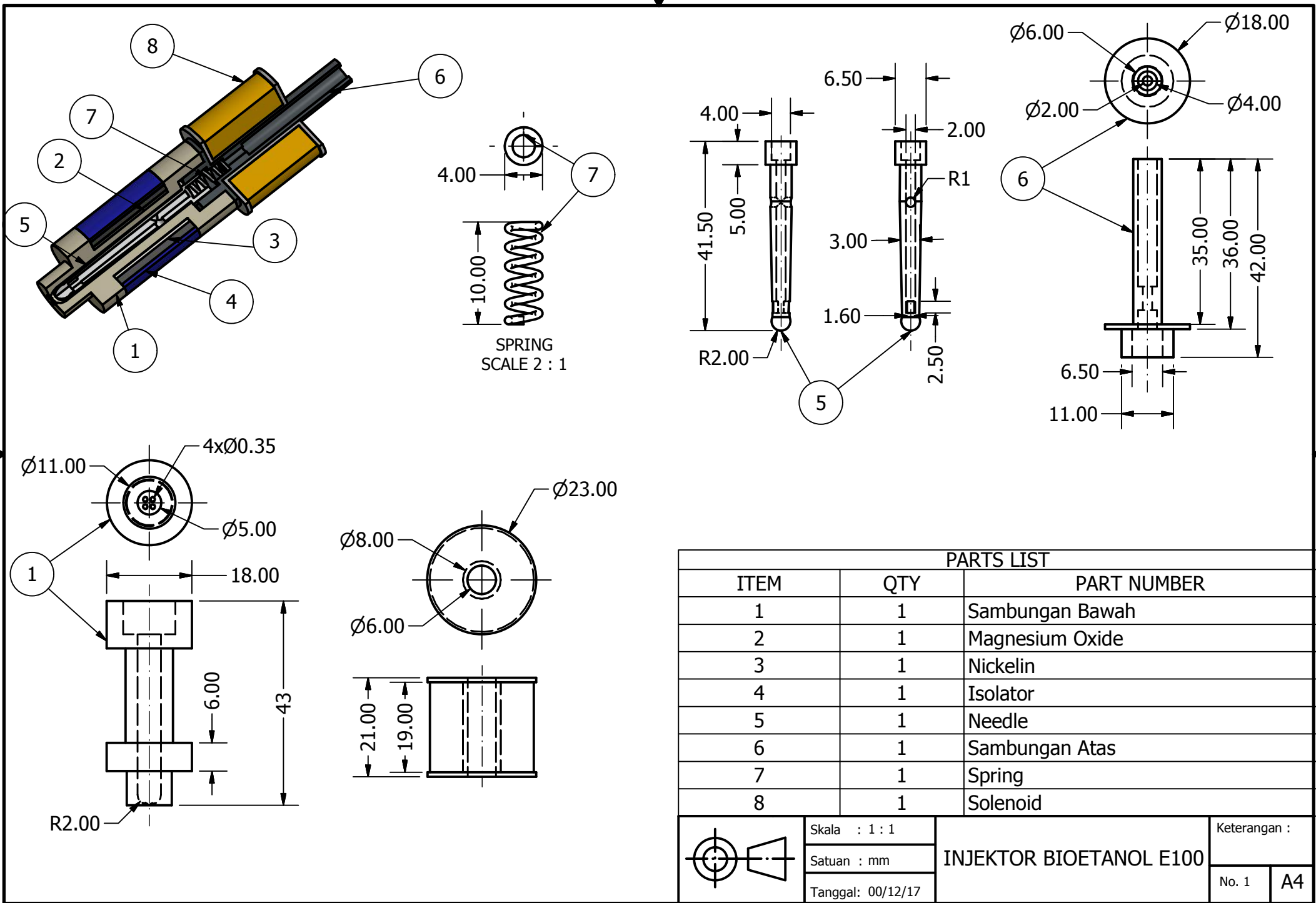
Variasi temperatur

Tekanan [bar]	Pulse width [ms]	50°C			60°C			70°C		
		waktu penyemprotan [s]	Volume 10^6 [m ³]	Laju alir massa bb 10^6 [kg/s]	waktu penyemprotan [s]	Volume 10^6 [m ³]	Laju alir massa bb 10^6 [kg/s]	waktu penyemprotan [s]	Volume 10^6 [m ³]	Laju alir massa bb 10^6 [kg/s]
3	3	52	37,5	537	53	37,5	506	54	37,5	479
	4	54	53,15	733	56	55	702	56	55	678
	5	56	71,25	948	56	68	868	55	65	816
	6	57	90	1176	58	86,5	1066	57	85	1030
4	3	54	40	552	53	38,5	519	54	38,5	492
	4	57	55	719	55	58,25	757	55	58,25	731
	5	56	72,5	965	56	75	957	56	75	925
	6	57	95	1242	57	95	1191	57	95	1151
5	3	55	42,5	576	57	42,5	533	55	41,25	518
	4	55	61,25	830	56	59	753	55	59	741
	5	57	77,5	1013	57	72,5	909	57	71,25	863
	6	58	97,5	1252	58	92,5	1140	58	94,25	1122

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Lampiran 2
Gambar Teknik Injektor

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIOGRAFI PENULIS



Nama Lengkap Penulis Ramadhani Ayu Setia Ningrum. Dilahirkan di Karanganyar pada tanggal 22 Februari 1995. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara.

Pendidikan formal yang ditempuh penulis yakni, dimulai pada tahun 2001 – 2003 di SDN Cipinang Melayu 10 Pagi Jakarta Timur, tahun 2003 – 2007 di MIM Karanganyar, tahun 2007 – 2010 di SMP Negeri 1 Karanganyar, tahun 2010-2013 di SMA Negeri 1 Karanganyar kemudian penulis melanjutkan jenjang pendidikan S1 Teknik Mesin di ITS pada tahun 2013. Konversi Energi Merupakan bidang studi yang dipilih penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir.

Selama kuliah di teknik mesin penulis aktif dalam berorganisasi di dalam Ash-Shaff sebagai staff internal keputrian (2014-2015) dan Kepala Keputrian Departemen Pemberdayaan Sumber Daya Mahasiswa (2015 – 2016). Selain itu penulis juga berkegiatan dalam bidang akademik diantaranya menjadi asisten Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa (2016) dan menjadi grader matakuliah Elemen Mesin I (2016) dan Termodinamika II (2017).

Jika ada informasi, pertanyaan, maupun saran yang ingin disampaikan kepada penulis, dapat menghubungi penulis melalui email ramadhaniayusn@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)